

RECUEIL DE RAPPORTS
sur
LES PROGRÈS DES LETTRES ET DES SCIENCES
EN FRANCE.

2 - 1



PARIS.

LIBRAIRIE DE L. HACHETTE ET C^{ie},

BOULEVARD SAINT-GERMAIN, N^o 77.

612977

1

RECUEIL DE RAPPORTS

SUR

LES PROGRÈS DES LETTRES ET DES SCIENCES

EN FRANCE.

RAPPORT SUR LES PROGRÈS

DE

LA THERMODYNAMIQUE

EN FRANCE,

PAR M. BERTIN,

MAÎTRE DE CONFÉRENCES À L'ÉCOLE NORMALE,

PROFESSEUR SUPPLÉANT AU COLLÈGE DE FRANCE.

PUBLICATION FAITE SOUS LES AUSPICES

DU MINISTÈRE DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE.



PARIS.

IMPRIMÉ PAR AUTORISATION DE SON EXC. LE GARDE DES SCAUX

A L'IMPRIMERIE IMPÉRIALE.

M DCCG LXVII.

RAPPORT SUR LES PROGRÈS
DE
LA THERMODYNAMIQUE
EN FRANCE.



INTRODUCTION.

Autrefois on attribuait les phénomènes de la chaleur à une substance matérielle, à un fluide impondérable qu'on appelait la *calorique*. Aujourd'hui tout le monde est d'accord pour regarder la chaleur comme un mouvement vibratoire analogue au mouvement lumineux.

La chaleur étant un mouvement, ses manifestations sont assujetties aux lois de la mécanique, qui est devenue ainsi la science universelle. Parmi ces lois, la plus générale est le principe de Leibnitz ou de la *conservation des forces vives*. On appelle *force vive* le produit de la masse par le carré de la vitesse : quand deux corps réagissent l'un sur l'autre, ce produit doit rester constant, la force vive perdue par l'un des corps doit être intégralement gagnée par l'autre.

Mais il est possible que cette force vive se transforme, il est possible que les forces qui sollicitaient le corps tant à l'intérieur qu'à l'extérieur aient produit des changements dans ce corps. On

Thermodynamique.

dit alors qu'elles ont travaillé, en appelant *travail* le produit d'une force par le déplacement de son point d'application dans la direction de cette force. La force qui imprime à un corps une certaine vitesse doit faire un travail précisément égal à la moitié de la force vive communiquée à ce corps; et, réciproquement, toute destruction de force vive produit un travail égal à la moitié de la force vive détruite.

Voilà une balle qui vient d'être tirée contre un mur : sa vitesse est anéantie, sa force vive est donc détruite. Qu'est-elle devenue? Elle s'est transformée en travail d'abord, travail moléculaire pour dégrader le mur et pour aplatir le métal; mais ce travail ne représente pas toute la force vive disparue; ce qu'il en reste se retrouve dans la balle et dans le mur sous forme de mouvement vibratoire ou de chaleur.

C'est le principal mérite de la science moderne d'avoir pris pour base de l'étude de la chaleur la possibilité de ces transformations et la nécessité de leur équivalence; mais cette idée n'est pas aussi nouvelle qu'on le croit.

« Laplace et Lavoisier, en 1780, parlaient déjà des physiciens qui pensent que la chaleur est le résultat des vibrations insensibles de la matière, qu'elle est la force vive qui résulte des mouvements insensibles des molécules des corps¹. » Loin de partager cette manière de voir, Laplace et Lavoisier doivent être comptés, au contraire, au premier rang des promoteurs de la matérialité du calorique.

Fresnel était d'une autre école; en étudiant la réflexion de la lumière, il explique ainsi ce que devient la partie qui n'est pas réfléchie :

« Les corps absorbent (pour me servir de l'expression usitée) une portion notable de la lumière incidente; mais il n'en faut pas conclure que le principe de la conservation des forces vives n'est plus applicable à ces phénomènes; il résulte au contraire, de l'idée

¹ *Mémoires de l'Académie des sciences*, année 1780, p. 357 et 358. Passage cité

par M. Verdet. (*Exposé de la théorie mécanique de la chaleur*, p. 111.)

la plus probable qu'on puisse se faire sur la constitution mécanique des corps, que la somme des forces vives doit toujours rester la même et que *la quantité de forces vives qui disparaît comme lumière est reproduite en chaleur*¹.

On ne saurait mieux dire; on n'exprimerait pas autrement aujourd'hui la transformation des forces naturelles et l'équivalence de ces transformations. Mais si cette idée est la base de la science moderne, elle ne la constitue pas tout entière; il fallait la développer, en faire sortir toutes les conséquences qu'elle renferme, l'appliquer non pas seulement à un phénomène particulier, mais à l'ensemble des phénomènes naturels, et c'est ce qui n'a été fait que longtemps après Fresnel.

N'ayant à parler ici que des travaux accomplis en France, je n'ai point à exposer le développement qu'a pris la science dans d'autres pays. Je rappellerai seulement, en prenant pour guide M. Verdet, l'homme le plus compétent dans les questions d'érudition scientifique, que les travaux qui ont fondé la science de 1842 à 1849 sont l'œuvre exclusive de trois hommes : le docteur Mayer, de Heilbronn; l'ingénieur Colding, de Copenhague, et le professeur Joule, de Manchester. La priorité dans l'ordre des publications appartient incontestablement au médecin allemand. M. Joule est peut-être celui qui a le plus fait pour la démonstration du nouveau principe et pour son adoption. La constitution définitive de la science thermodynamique, l'établissement clair et méthodique des procédés d'investigation et de raisonnement qui lui sont propres, ainsi que son application détaillée à la théorie des machines, sont principalement dus aux efforts de trois auteurs : MM. Clausius, de Zurich; Macquorn Rankine, de Glasgow, et William Thompson, d'Édimbourg. Leurs recherches les plus importantes ont été publiées de 1849 à 1851².

¹ *Supplément à la Chimie de Thompson*, page 40, Paris 1822. Passage cité par M. Bohn, professeur à l'université de

Giessen. (*Annales de chimie et de physique*, 4^e série, t. IV, p. 280.)

² Verdet, *Exposé*, etc. p. 115-118.

Longtemps auparavant, Sadi Carnot avait cherché à établir les lois générales de la puissance motrice du feu sur le principe, le plus généralement admis de son temps, de la matérialité, et par conséquent de l'indestructibilité du calorique¹. « Malgré cette erreur fondamentale, dit encore M. Verdet, le nom de Sadi Carnot et celui de son savant commentateur, M. Clapeyron, occuperont toujours une place importante dans l'histoire de la science. Sadi Carnot est l'auteur des formes de raisonnements dont la théorie mécanique fait sans cesse usage; c'est dans son écrit qu'on trouve les premiers exemples de ces cycles d'opération qui prennent un corps dans un état déterminé, le font passer à un état différent, en suivant un certain chemin, et le ramènent par une autre voie à son état primitif. M. Clapeyron a éclairci ce que le mémoire de Carnot avait d'obscur, et a montré comment on devait traduire analytiquement et représenter géométriquement ce mode de raisonnement si neuf et si fécond². Ces deux géomètres ont créé en quelque sorte la logique de la science. Lorsque les véritables principes ont été découverts, il n'y a eu qu'à les introduire dans les formes de cette logique, et il est à croire que, sans les anciens travaux de Carnot et de M. Clapeyron, les progrès de la théorie nouvelle n'auraient pas été à beaucoup près aussi rapides³. »

J'ajouterai que leur théorie a été en grande partie utilisée dans la thermodynamique moderne. C'est Carnot qui le premier a démontré que, quel que soit le corps qui nous donne du travail mécanique, quand on le met alternativement en contact avec une source de chaleur et une source de froid, la quantité de travail obtenue ne dépend absolument que des températures extrêmes entre lesquelles on opère.

Ce principe est resté dans la théorie mécanique de la chaleur et constitue la seconde des deux propositions fondamentales de cette

¹ *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, Paris, 1824.

chaleur. (*Journal de l'École polytechnique*, année 1834.)

² *Mémoire sur la puissance motrice de la*

³ Verdet, *Exposé*, p. 114.

théorie, la première n'étant autre chose que le principe de l'équivalence.

Depuis la création de la thermodynamique, quelle a été la part des savants français dans le mouvement scientifique auquel elle a donné lieu ?

Au point de vue expérimental cette part est considérable. La nouvelle théorie, pour devenir une science physique, pour pouvoir contrôler les expériences et les grouper synthétiquement, avait besoin de s'appuyer sur une connaissance exacte des lois naturelles, sur une mesure précise des coefficients qu'elle devait employer. Cette partie expérimentale est toute française, et due principalement aux excellents travaux de M. Regnault. Sans ses belles recherches sur la loi de Mariotte, sur la dilatation des gaz, sur les chaleurs spécifiques, sur la force élastique des vapeurs et sur leurs chaleurs latentes, la théorie mécanique de la chaleur ne serait qu'un recueil de formules sans aucune application. Malgré leur importance, je ne ferai que citer ces magnifiques travaux, parce qu'ils trouveront naturellement leur place dans le rapport spécial consacré à l'exposé des progrès de la chaleur considérée expérimentalement.

Au point de vue théorique notre part est loin d'être aussi belle. Il faut bien l'avouer, parce que c'est la vérité : nous sommes restés longtemps, je ne dis pas rebelles, mais étrangers aux nouvelles idées; elles nous sont restées trop longtemps inconnues, et, encore aujourd'hui, on peut regretter qu'elles n'occupent pas une place plus considérable dans notre enseignement scientifique.

L'homme qui a le plus fait pour les répandre en France est sans contredit M. Verdet, dont la science déplore la perte récente. Mais son action n'a commencé qu'en 1852 : c'est à partir de cette époque qu'il a publié dans presque tous les volumes des *Annales de chimie et de physique* des résumés admirablement faits des travaux accomplis en Allemagne et en Angleterre sur la thermodynamique. Ces travaux y sont analysés, discutés et souvent éclaircis par une critique élevée dont lui seul possédait le secret.

RAPPORT SUR LES PROGRÈS

Il a rendu un second service à la science par la publication de son *Exposé de la théorie mécanique de la chaleur*¹. Ce petit traité est un livre excellent, que tous ceux qui veulent être au courant de la nouvelle théorie doivent lire et méditer. Ils y trouveront, sous une forme élémentaire mais sérieuse, un résumé fidèle et consciencieux d'une science dont tout le monde parle, mais que peu de personnes ont le courage d'approfondir.

Son enseignement à l'École normale, à l'École polytechnique et surtout à la Faculté des sciences n'a pas été moins fécond. Le monde savant attend avec impatience la publication du cours qu'il a fait à la Sorbonne sur la thermodynamique, dans les dernières années de sa vie.

Après M. Verdet, il faut citer, parmi les promoteurs des idées nouvelles, M. Hirn, de Logelbach (près Colmar). Son premier ouvrage a fait sensation; c'est un long mémoire couronné par l'Académie de Berlin en 1857, sur le rapport d'un maître de la science, M. Clausius². Sa *Théorie mécanique de la chaleur* est arrivée rapidement à sa seconde édition³. Ceux que les longs calculs effrayent ne sauront gré de leur signaler les *Lectures* faites par le même auteur à la Société des sciences de Colmar, ouvrage écrit d'un style charmant et qui mériterait d'être réimprimé⁴.

En 1864, M. l'abbé Moigno nous a donné une excellente traduction d'un petit chef-d'œuvre de M. John Tyndalh, intitulé : *La chaleur considérée comme un mode de mouvement*⁵. Cette traduction et celle de la *Radiation*, du même auteur⁶, doivent être mises au premier rang des livres qui ont popularisé chez nous la nouvelle théorie.

¹ Leçons faites à la Société chimique; Paris, 1862.

² *Recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur*, présentées à la Société de physique de Berlin par Gustave-Adolphe Hirn, ingénieur civil; in-8°; Mallet-Bachelier, Paris, 1858.

³ *Théorie mécanique de la chaleur, expo-*

sition analytique et expérimentale; 2^e édition, Bachelier, Paris, 1865.

⁴ *Mémoires de la Société des sciences de Colmar* pour 1864.

⁵ 1 volume in-12, Ét. Giraud, Paris, 1864.

⁶ 1 volume in-12, Ét. Giraud, Paris, 1865.

Un ouvrage du même genre vient d'être publié par M. Cazin, professeur à Versailles¹; on ne peut que lui souhaiter le même succès.

Enfin M. Combes nous a donné cette année un livre qui ne peut manquer d'avoir une heureuse influence sur le développement de la thermodynamique : c'est un traité mathématique de la théorie mécanique de la chaleur, considérée surtout dans ses rapports avec la science de l'ingénieur².

Si nous ajoutons à ces traités l'exposé publié par M. Réal dans les *Annales des mines*, nous aurons, je crois, la liste complète des livres écrits en français, soit sous une forme élémentaire, soit sous une forme mathématique, sur l'ensemble de la théorie qui nous occupe. Je me contente de citer ces traités dogmatiques; j'en extrairai seulement les recherches originales pour les joindre aux mémoires analogues publiés dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences* et les *Annales de chimie et de physique*, et dont voici d'abord la liste :

REGNAULT. — 1845. Mémoire sur les vapeurs. (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXI, p. 1287.)

BRIOT. — 1847. Essai sur la théorie mécanique de la chaleur. (Seulement le titre.) (*C. R. de l'Acad.* t. XXIV, p. 877.)

SEGUIN (ainé). — 1847. Note à l'appui de l'opinion émise par M. Joule sur l'identité du mouvement et du calorique. — C'est dans cette Note que M. Seguin réclama pour lui et pour son oncle, Montgolfier, la priorité de cette idée, que le calorique et le mouvement sont dus à une même cause. Note importante pour l'histoire de la science. (*C. R. de l'Acad.* t. XXV, p. 420.)

BEAUMONT. — 1850. Annonce du *thermogénérateur*, appareil qui par le frottement échauffe l'eau à 120°. (*C. R. de l'Acad.* t. XXXI, p. 314.)

¹ 1 volume in-12, Ét. Giraud, Paris, 1867.

² 1 volume in-8°, Ét. Giraud, Paris, 1867.

REECH. — 1851. Théorie de la force motrice du calorique. (*C. R. de l'Acad.* t. XXXIII, p. 567.)

1851. Mémoire de mathématiques. (*C. R. de l'Acad.* t. XXXIV, p. 21.)

REGNAULT. — 1853. Recherches sur les chaleurs spécifiques des fluides élastiques. (*C. R. de l'Acad.* t. XXXVI, p. 676.)

1854. Annonce du Mémoire sur la chaleur spécifique des gaz à volume constant, sur la chaleur dégagée par leur compression et sur les effets calorifiques de la détente et du mouvement des gaz. (*C. R. de l'Acad.* t. XXXVIII, p. 853.)

FAVRE. — 1854. Recherches thermiques sur la pile. (*Annales de chimie et de physique*, t. XL, p. 293.)

PERSON. — 1854. Note sur l'équivalent mécanique de la chaleur. C'est simplement le calcul fait anciennement par Mayer sur l'air. (*C. R. de l'Acad.* t. XXXIX, p. 1131.)

SEGUIN. — 1855. L'auteur rappelle les idées qui lui avaient été communiquées par Montgolfier sur la nature de la chaleur, la construction par Montgolfier d'une machine appelée *Pyro-bélier*, pour convertir économiquement la chaleur en force motrice, et il cherche la solution de ce problème dans l'emploi de la vapeur surchauffée. Réclamation de M. Siemen, qui annonce être breveté depuis 1847 pour l'emploi de la vapeur surchauffée. (*C. R. de l'Acad.* t. XL, p. 5.)

FOUCAULT. — 1855. De la chaleur produite par l'influence de l'aimant sur les corps en mouvement. (*C. R. de l'Acad.* t. XLI, p. 450.)

VIARD. — 1855. Production de chaleur dans la flexion d'une tige métallique. (*C. R. de l'Acad.* t. XLI, p. 1171.)

FAVRE. — 1857. Chaleur engendrée par un courant qui produit un effet mécanique. (*C. R. de l'Acad.* t. XLV, p. 56.)

LEROUX. — 1857. Étude des machines électro-magnétiques. (*Ann. de ch. et de phys.* t. L, p. 463.)

HIRN. — 1858. Changement de densité du caoutchouc étiré. (*C. R. de l'Acad.* t. XLVI.)

MASSON. — 1858. Corrélation des propriétés physiques. (*Ann. de ch. et de phys.* t. LIII, p. 257.)

- RECH. — 1858. Présentation de la suite de ses recherches. (*C. R. de l'Acad.* t. XLVI, p. 336.)
- FAVRE. — 1858. Recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur. (*C. R. de l'Acad.* t. XLVI, p. 337.)
- D'ESTOCQUOIS. — 1858. Note sur l'équivalent mécanique de la chaleur $E = 175$. (*C. R. de l'Acad.* t. XLVI, p. 464.)
- MARIÉ-DAVY et TROOST. — 1858. Mémoire sur la détermination, par la pile, des quantités de travail moléculaire. (*C. R. de l'Acad.* t. XLVI, p. 748 et 936. — *Ann. de ch. et de phys.* t. LIII, p. 423.)
- LABOULAYE. — 1858. Détermination de l'équivalent par l'écrasement du plomb, $E = 187$. (*C. R. de l'Acad.* t. XLVI, p. 773.)
1858. Mémoire sur la production de la chaleur par les affinités chimiques et sur les équivalents mécaniques des corps. (*C. R. de l'Acad.* t. XLVII, p. 824.)
- BOURGET. — 1859. Théorie mathématique des effets dynamiques de la chaleur donnée à un gaz permanent. (*Ann. de ch. et de phys.* t. LVI, p. 257.)
- LEROUX. — 1860. Sur des phénomènes de chaleur qui accompagnent, dans certaines circonstances, le mouvement vibratoire d'un corps. (*C. R. de l'Acad.* t. L, p. 656.)
- BÉCLARD. — 1860. De la chaleur produite pendant le travail de la contraction musculaire. (*C. R. de l'Acad.* t. L, p. 471.)
- RÉSAL. — 1860. Recherches sur les effets mécaniques produits dans les corps par la chaleur. — Énoncé de formules relatives aux trois classes de corps. (*C. R. de l'Acad.* t. LI, p. 449.)
- DESPRELS. — 1860. Expression analytique de l'équivalent mécanique de la chaleur dans les gaz. (*C. R. de l'Acad.* t. LI, p. 496.)
- MARIÉ-DAVY. — 1861. L'électricité considérée comme puissance mécanique. (*C. R. de l'Acad.* t. LII, p. 732.)
Note sur la théorie mécanique de la chaleur. — Établissement de formules. (*C. R. de l'Acad.* t. LIII, p. 904.)
1862. De la mesure, par la pile, des chaleurs de combinaisons des différents métaux. (*C. R. de l'Acad.* t. LIV, p. 1103.)
- CAZIN. — 1862. Étude sur la détente et la compression des gaz. (*Ann. de ch. et de phys.* t. LVI, p. 206.)

DUPRÉ et REECH. — 1863. Discussion entre eux et avec Clausius sur la thermodynamique. (*C. R. de l'Acad.* t. LVII, p. 339.)

TRESCA et LABOULAYE. — 1864. Recherches expérimentales sur la théorie de l'équivalent mécanique de la chaleur. (*C. R. de l'Acad.* t. LVIII, p. 358.)

BURDIN. — 1864. De l'équivalent mécanique. (*C. R. de l'Acad.* t. LVIII, p. 885.)

MORIN. — 1865. Rapport sur le mémoire de MM. Tresca et Laboulaye. (*C. R. de l'Acad.* t. LX, p. 326.)

SEGUIN. — 1865. Mémoire sur les causes et les effets de la chaleur, de la lumière et de l'électricité. (*C. R. de l'Acad.* t. LXI, p. 980.)

DEPRÉ. — 1860. Sur le travail mécanique et ses transformations. Premier mémoire. (*C. R. de l'Acad.* t. L, p. 588.)

1861. Deuxième mémoire et nouvelle rédaction du premier. (*C. R. de l'Acad.* t. LII, p. 1185.)

1862. Troisième mémoire. (*C. R. de l'Acad.* t. LIV, p. 907.)

Supplément relatif à la mesure des vapeurs saturées. (*C. R. de l'Acad.* t. LIV, p. 972.)

Supplément relatif à la définition et à la mesure des températures. (*C. R. de l'Acad.* t. LIV, p. 1065.)

1863. Sur la condensation des vapeurs pendant la détente ou la compression. (*C. R. de l'Acad.* t. LVI, p. 960.)

Discussion avec M. Reech. (*C. R. de l'Acad.* t. LVII, p. 108 et 589.)

Application de la théorie mécanique de la chaleur à la discussion des expériences de M. Regnault sur la compressibilité des gaz. (*C. R. de l'Acad.* t. LVII, p. 774.)

1864. Mémoire sur la valeur de l'attraction au contact, la valeur du travail chimique dû à une élévation de température, la loi des chaleurs spécifiques des corps simples ou composés, et la seconde vaporisation des corps. (*C. R. de l'Acad.* t. LVIII, p. 163.)

Rectification de la formule donnée par M. W. Thompson pour calculer les changements de température que produit une compression ou une expansion avec travail complet. (*C. R. de l'Acad.* t. LVIII, p. 539.)

Sur la loi de M. Regnault relative aux tensions maximum des vapeurs. (*C. R. de l'Acad.* t. LVIII, p. 806.)

Sur la vitesse d'écoulement des gaz par des orifices en minces parois. (*C. R. de l'Acad.* t. LVIII, p. 1004.)

Mémoire sur la résistance que les fluides opposent au mouvement. (*C. R. de l'Acad.* t. LVIII, p. 1061.)

Sur les lois de compressibilité et de dilatation des corps. (*C. R. de l'Acad.* t. LIX, p. 490.)

Réflexions sur les formules pour l'écoulement des fluides données par M. Zeuner, et réclamation de priorité relative à l'une d'elles. Nouveau théorème sur les capacités. (*C. R. de l'Acad.* t. LIX, p. 596.)

Réponse à deux Notes de M. W. Thompson sur des questions de thermodynamique. (*C. R. de l'Acad.* t. LIX, p. 768.)

Théorie des gaz et comparaison des expériences de M. Regnault avec les lois qu'elle renferme. (*C. R. de l'Acad.* t. LIX, p. 905.)

1865. Sur les chaleurs latentes. (*C. R. de l'Acad.* t. LX, p. 339.)

Sur les principes fondamentaux de la théorie mécanique de la chaleur. (*C. R. de l'Acad.* t. LX, p. 718.)

Lettre en réponse à des observations de M. A. Hirn concernant cette note. (*C. R. de l'Acad.* t. LX, p. 864.)

Réponse à des remarques de M. Clausius relatives à la même communication. (*C. R. de l'Acad.* t. LX, p. 1156.)

Sur l'emploi des températures absolues dans la théorie mécanique de la chaleur. (*C. R. de l'Acad.* t. LX, p. 1024.)

Cinquième mémoire sur la théorie mécanique de la chaleur. (*C. R. de l'Acad.* t. LXI, p. 582.)

Réponse à des observations de M. Clausius. (*C. R. de l'Acad.* t. LXI, p. 738.)

1866. Sur le nombre des molécules contenues dans l'unité de volume. (*C. R. de l'Acad.* t. LXII, p. 39.)

Théorie mécanique de la chaleur. (*C. R. de l'Acad.* t. LXII, p. 622.)

Sur la loi qui régit le travail de réunion des corps simples et sur les attractions à de petites distances. (*C. R. de l'Acad.* t. LXII, p. 791.)

Sur la théorie de la diffusion. (*C. R. de l'Acad.* t. LXII, p. 1072.)

Les différents mémoires de M. Dupré sont publiés dans les *Annales de chimie et de physique*, 4^e série.

DUPRÉ. — 1864. Premier mémoire sur la théorie mécanique de la chaleur. (*Ann.* t. I, p. 168 et 175.)

Deuxième mémoire. Première partie. (*Ann.* t. II, p. 185.)

Deuxième mémoire. Deuxième partie. (*Ann.* t. III, p. 76.)

Deuxième mémoire. Troisième partie. (*Ann.* t. IV, p. 209.)

Troisième mémoire. (*Ann.* t. IV, p. 426.)

Quatrième mémoire. (*Ann.* t. V, p. 438.)

Cinquième mémoire. (*Ann.* t. VI, p. 274.)

Cinquième mémoire. (*Ann.* t. VII, p. 189, 236, 257 et 406.)

BABINET. — 1866. Théorie de la chaleur dans l'hypothèse des vibrations et note sur la force vive moyenne d'un mobile oscillant sous l'empire d'une force proportionnelle à l'écart. (*C. R. de l'Acad.* t. LXII, p. 581 et 662.)

CAZIN. — 1866. Mémoire sur la détente de la vapeur saturée. (*C. R. de l'Acad.* t. LXII.)

HIRN et CAZIN. — 1866. Mémoire sur la détente de la vapeur d'eau surchauffée. (*C. R. de l'Acad.* t. LXIII. — *Ann.* t. X.)

Je vais maintenant tâcher d'exposer brièvement les recherches originales contenues dans les divers travaux que je viens de citer. Je grouperai ces travaux par ordre de matière à l'exception de ceux de M. Dupré, parce qu'ils forment un ensemble qu'il serait maladroit de détruire.

CHAPITRE PREMIER.

THÉORIE DES ACTIONS MOLÉCULAIRES.

§ 1^{er}. DÉFINITIONS ET GÉNÉRALITÉS.

Quand le mouvement calorifique se communique à un corps, il en résulte en général trois effets : le mouvement vibratoire déjà existant dans ce corps est modifié, l'amplitude et la vitesse de vibration augmentent, et c'est en cela que consiste l'élévation de température ou l'*échauffement* du corps; c'est du mouvement communiqué, mais non transformé. En outre le corps se dilate, ses molécules s'écartent en surmontant les résistances des actions moléculaires, et il en résulte un *travail interne* plus ou moins considérable. Enfin, en troisième lieu, les pressions extérieures sont déplacées, et il en résulte un autre travail qu'on appelle le *travail externe*.

Cette distinction entre la chaleur qui produit l'échauffement du corps et celle qui produit le travail total de la dilatation est fondamentale dans la théorie mécanique de la chaleur; mais elle est bien plus ancienne que cette théorie. On la retrouvera dans tous les travaux de M. Regnault : elle est clairement indiquée dans son premier *Mémoire sur les chaleurs spécifiques* publié en 1840¹, et qui contient à la page 66 ce passage caractéristique : « La capacité calorifique des corps, telle que nous la déterminons par l'expérience, s'obtient d'après l'observation de la quantité de chaleur que le corps a dû absorber pour produire son élévation thermométrique; or c'est là,

¹ *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. LXXIII, p. 1.

à proprement parler, sa *chaleur spécifique*, plus la quantité de chaleur qu'il a dû prendre pour produire sa dilatation.»

Ainsi *échauffement*, *travail interne* et *travail externe*, tels sont les trois effets que produit la force vive de la chaleur quand elle se communique à un corps. La partie de la chaleur qui a produit l'échauffement est donc seule restée à l'état de mouvement ou de force vive; le reste s'est transformé en travail : c'est ce qu'on appelle de la *chaleur détruite*. Ce mot, comme on le voit, ne doit pas être pris dans un sens absolu; il signifie *chaleur transformée* et pas autre chose. Car, si nous pouvons transformer le mouvement, nous sommes aussi impuissants pour le créer et pour le détruire que pour créer et pour détruire la matière. C'est dans ce sens qu'il faut toujours comprendre le symbole de la nouvelle théorie : *chaleur détruite*, *travail produit*, et, réciproquement, *travail détruit*, *chaleur produite*. Ces manières de parler signifient simplement que la chaleur ou la force vive se transforme en travail, et cette transformation est toujours assujettie à cette grande loi de la mécanique : *le travail produit est toujours la moitié de la force vive détruite*.

L'équivalent mécanique de la chaleur est le travail produit par la destruction de 1 *calorie*, c'est-à-dire de la quantité de chaleur capable d'échauffer de 1 degré 1 kilogramme d'eau. Pour le déterminer que faut-il faire ? Il faut commencer par mesurer en calories la chaleur qui a pénétré dans le corps, en retrancher celle qui correspond à l'échauffement seulement, c'est-à-dire celle qui échaufferait le corps sans le dilater : la différence serait la chaleur détruite ou transformée, et elle doit être précisément équivalente à tout le travail produit. Il faut donc en second lieu mesurer ce travail tant interne qu'externe, et le diviser par la chaleur détruite. On trouvera ainsi des nombres qui pourront varier avec la nature des corps sur lesquels on aura opéré, mais dont les différences devront être attribuées uniquement aux incertitudes de l'expérience. Ces nombres ne diffèrent du reste pas beaucoup les uns des autres :

le plus probable est 425 : ce qui veut dire que 1 calorie peut se transformer en 425 kilogrammètres, le *kilogrammètre* ou l'unité de travail étant le travail nécessaire pour soulever un poids de 1 kilogramme à 1 mètre de hauteur. Dans l'industrie on mesure souvent le travail des machines en chevaux-vapeur, chaque cheval produisant un travail de 75 kilogrammètres par seconde; on peut donc dire aussi qu'une machine à feu de 5 chevaux $\frac{1}{5}$ est une machine dans laquelle il disparaît 1 calorie par seconde; une machine de 17 chevaux détruirait juste 3 calories par seconde, et ainsi de suite.

Au lieu d'employer un corps à détruire de la chaleur pour produire du travail, on peut le faire servir à détruire du travail, et alors il produira de la chaleur. Une partie du travail communiqué produira dans le corps un travail moléculaire interne, qu'il faudra tout d'abord retrancher du travail employé pour modifier le corps; la différence serait le travail détruit ou transformé, et c'est cette différence qu'il faudrait diviser par la chaleur développée pour avoir l'équivalent mécanique de la calorie.

Nous sommes ici dans le vif de la question; éclaircissons ce point par quelques exemples.

Une barre de fer qui s'échauffe se dilate. Une partie de la chaleur qui y pénétre se transforme donc en travail d'écartement des molécules ou en travail de dilatation. La théorie nous apprend bien que l'échauffement et le travail doivent reproduire la chaleur communiquée; mais elle ne nous dit pas quel sera le sens du travail moléculaire, si le corps se dilatera ou bien s'il se contractera : c'est à l'expérience à nous l'apprendre. En général les corps se dilatent, comme le fer, quand on les chauffe; mais il y en a qui se contractent, comme le caoutchouc; il y en a même qui subissent l'un et l'autre effet : ainsi l'eau qui reçoit de la chaleur se dilate si sa température est supérieure à 4°; elle se contracte au-dessous de cette température, et il en est de même pour tous les corps qui ont un maximum de densité.

Mais si la théorie est impuissante pour nous faire prévoir le signe du travail moléculaire produit par la chaleur, elle peut en assigner *a priori* les conséquences. Ainsi, le fer en absorbant de la chaleur se dilate : donc, si on l'étire sous l'action d'une force extérieure, il doit absorber de la chaleur, qu'il prendra à sa propre substance, et il se refroidira. Le caoutchouc se dilate, au contraire, quand on le refroidit ou quand on lui prend de la chaleur : donc, si l'on étire une lame de caoutchouc, elle s'échauffera. Dans l'étirage du caoutchouc, une partie du travail moléculaire se transforme en chaleur, tandis que, dans l'étirage du fer, une partie de la chaleur du corps se transforme en travail moléculaire¹.

Les phénomènes inverses découlent des précédents. Quand le fer se refroidit, ou quand il dégage de la chaleur, il se contracte : donc, si on le comprime, il s'échauffera. Quand on donne de la chaleur au caoutchouc, ou quand il absorbe de la chaleur, il diminue de volume : donc, quand on le comprime, il absorbe de la chaleur ou se refroidit. La chaleur dilate l'eau au-dessus de 4°, et la contracte au-dessous : donc, si on la comprime, elle s'échauffera si elle est au-dessus de 4°, et se refroidira si elle est au-dessous. Tous ces faits sont prouvés par l'expérience.

Les changements d'état nous offrent un exemple curieux de la transformation de la chaleur en travail moléculaire. Quand on donne de la chaleur à de la glace à 0°, on ne l'échauffe pas, on la fond. Ici la force vive communiquée est entièrement transformée en travail moléculaire. Les molécules qui étaient orientées dans la glace se séparent pour se grouper de toutes les manières possibles. En général, dans ce nouvel arrangement, qui constitue l'état liquide, les molécules sont plus écartées que dans l'état solide, et le corps en fondant se dilate; mais il y a des exceptions,

¹ M. Hirn a démontré que, quand on étire une bande de caoutchouc, la densité de ce corps s'accroît bien loin de diminuer, comme on aurait pu le croire. C'est

donc à une compression réelle qu'est dû tout naturellement l'échauffement bien connu qui se manifeste dans ce cas. (Communiqué à l'Académie en 1858.)

et notamment pour la glace, qui en fondant diminue de volume. Ces exceptions sont assurément fort curieuses, mais elles n'ont rien qui doive nous étonner. Nous ne pouvons pas dire *à priori* quel sera le signe du travail de désagrégation qu'on appelle la *fusion*; nous ne pouvons pas dire si les molécules s'écartent ou se rapprochent; il est seulement certain qu'elles se déplacent, et ce déplacement, quel qu'en soit le sens, constitue un travail moléculaire qui absorbe une quantité de force vive ou de chaleur: c'est là ce qu'on appelle la *chaleur latente*. L'expérience apprend que, pour la glace, cette chaleur latente est de 79 calories $\frac{1}{2}$. Nous en concluons que la désagrégation des molécules de la glace et le nouveau groupement qui les constitue à l'état liquide sont une opération mécanique qui, lorsqu'elle s'opère sur 1 kilogramme de glace, exige un travail de $425 \times 79 \frac{1}{2} = 33681$ kilogrammètres.

Ici encore la théorie intervient utilement pour nous indiquer les conséquences du fait fondamental emprunté à l'expérience. Quand de la glace à 0° absorbe de la chaleur, elle fond et diminue de volume sans s'échauffer; toute la chaleur est absorbée par le travail de la contraction. Mais, si nous fournissons ce travail par une compression extérieure, la chaleur nécessaire à la fusion sera moindre, et la glace pourra fondre au-dessous de 0°. Le point de fusion de la glace doit donc s'abaisser par la compression, et il en sera de même de tous les corps qui se dilatent en se solidifiant. Ce sera l'inverse pour ceux qui se contractent, et qui sont les plus nombreux.

Quand de l'eau s'échauffe de 0° à 100°, elle ne se dilate que de la vingt-troisième partie de son volume; elle repousse alors la pression atmosphérique en accomplissant un travail externe qui est peu considérable, car il ne s'élève pas à $\frac{1}{2}$ kilogrammètre par litre d'eau. Mais, une fois que l'eau est arrivée à 100°, une nouvelle addition de chaleur ne l'échauffe plus, elle la transforme en vapeur en lui faisant prendre un volume 1700 fois plus grand

que le sien. Ici le travail extérieur est considérable, car il est toujours égal au produit de la pression atmosphérique par l'augmentation de volume, et ce produit, calculé pour un litre d'eau, est de 17000 kilogrammètres. Ce travail extérieur absorbe déjà pour sa part 40 calories. Mais il y a, en outre, un travail moléculaire qui doit être très-grand, car tout ce travail, tant interne qu'externe, absorbe 537 calories par kilogramme d'eau : c'est là ce qu'on appelle la *chaleur latente* de la vapeur d'eau. C'est, en réalité, la force vive de 537 calories qui s'est transformée en travail de deux espèces : 40 calories ont été employées à repousser la pression atmosphérique, en produisant un travail de 17000 kilogrammètres; et en même temps 497 calories ont été employées à écarter les molécules de la vapeur d'eau en produisant un travail de 211225 kilogrammètres.

Voilà le plus bel exemple de la transformation de la force vive de la chaleur en travail. De l'eau à 100° est de l'eau dans un certain état vibratoire, dont la force vive est indiquée par la température. Elle est en contact avec un foyer plus chaud, ou dont la force vive est plus grande, et cependant la force vive du mouvement vibratoire primitif n'est pas augmentée, puisque la température est demeurée stationnaire. Qu'est donc devenu le mouvement que le foyer a communiqué à l'eau, la force vive qu'il y a introduite? Elle s'est transformée en travail, et l'eau s'est vaporisée. Dans l'acte de la vaporisation, le travail extérieur n'est pas négligeable, mais il est cependant plus petit que le travail moléculaire. Dans la fusion, le travail externe est trop petit pour qu'il soit nécessaire d'en tenir compte, le travail interne est seul à considérer. Dans la dilatation des gaz, tout porte à croire que c'est, au contraire, le travail interne qui est négligeable. Que conclure de là? C'est que le travail interne est très-variable, et qu'en général il échappe à toute détermination directe.

Il y a là une difficulté considérable, qui se présente chaque fois qu'on veut déterminer l'équivalent mécanique de la chaleur; car,

dans toutes les expériences qui tendent à ce but, on ne peut jamais mesurer que la chaleur et le travail extérieur; le travail moléculaire est toujours inconnu. Il est un moyen de tourner cette difficulté, et ce moyen nous le devons à Sadi Carnot. Il consiste à faire passer le corps par une série de changements qui le ramènent à son état primitif : c'est ce qu'on appelle un *cycle fermé*. Il est bien évident que, dans ce cas, le travail interne définitif est nul et se trouve, par cela même, éliminé. C'est dans ce cas seulement qu'il est permis de comparer la chaleur produite au travail extérieur détruit. Dans toute expérience établie pour déterminer les éléments de cette comparaison, il est donc indispensable qu'aucun changement permanent ne survienne dans l'état du corps, ou, en d'autres termes, que ce corps, à la fin des opérations auxquelles il aura été soumis, se retrouve exactement dans son état primitif.

C'est là un principe qu'il ne faut jamais perdre de vue quand on doit juger les travaux entrepris pour mesurer l'équivalent mécanique de la chaleur.

§ 2. PRODUCTION DE CHALEUR PAR LE FROTTEMENT.

La production de chaleur par le frottement ou par un travail moléculaire est connue depuis longtemps des physiciens. Je trouve dans les travaux modernes quelques expériences de cette nature qui méritent d'échapper à l'oubli.

M. Viard, en répétant l'expérience de M. Foucault sur la fixité du plan d'oscillation, observe un dégagement de chaleur dans une verge élastique montée sur un tour, lorsqu'il la courbe par son extrémité libre¹.

M. Leroux observe un dégagement de chaleur dans l'extrémité fixe d'une lame vibrante².

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XLI, p. 450; 1855.

² *Comptes rendus de l'Académie*, t. L, p. 656; 1860.

M. Beaumont annonce à l'Académie¹ qu'il est parvenu à construire un *thermogénérateur* dans lequel le frottement développe assez de chaleur pour échauffer l'eau d'une chaudière à 120°. Il est possible que le procédé ne soit pas industriel, mais ceux qui ont vu fonctionner le thermogénérateur à l'Exposition de 1855 n'ont pu s'empêcher d'acclamer ce magnifique exemple de la transformation du travail mécanique en chaleur.

Mais dans ces expériences il n'a pas été fait de mesures qui permettent de comparer la chaleur au travail; c'est ce qui leur ôte toute importance au point de vue scientifique. Nous devons nous étendre davantage sur les suivantes, qui ont un grand intérêt pour la thermodynamique.

§ 3. MESURE DE L'ÉQUIVALENT MÉCANIQUE AU MOYEN DE LA CHALEUR DÉVELOPPÉE PAR LE FROTTEMENT.

Plusieurs expériences ont été faites en France sur ce sujet, les unes par M. Hirn, les autres par M. Favre.

1° EXPÉRIENCES DE M. HIRN (1855-1858-1865).

1. Le comité de mécanique de la Société industrielle de Mulhouse avait demandé à M. Hirn un travail sur la manière d'essayer les huiles servant au graissage des machines. Son mémoire est inséré dans le *Bulletin* de cette Société (n° 128 et 129, janvier 1855); on le trouvera aussi dans le *Bulletin de la Société d'encouragement*, avec un rapport très-favorable de M. Combes. Le résultat industriel et pratique de ces expériences a été d'introduire peu à peu dans l'usage les huiles minérales, que l'on croyait absolument impropres au graissage des machines. Leur résultat scientifique a été de mettre en relief de la manière la plus frappante la proportionnalité qui existe entre le travail dépensé et la chaleur produite.

¹ *Comptes rendus*, t. XXXI, p. 314; 1850.

Ces expériences forment la première partie du mémoire présenté à l'Académie de Berlin en 1857. Voici comment M. Clausius en a rendu compte :

« Un tambour en fonte, parfaitement cylindrique, poli à sa surface externe et pouvant tourner sur son axe horizontal, était recouvert, à sa moitié supérieure, d'un coussinet métallique, de telle sorte que, lorsque le tambour tournait, il se produisait un frottement contre le coussinet. Entre les deux surfaces frottantes se trouvait un intermédiaire lubrifiant consistant en différentes sortes de graisses.

« La force consommée par le frottement était évaluée au moyen d'un appareil que l'auteur appelle *balance de frottement*, et qui consistait en un levier chargé par un poids, de manière à empêcher le coussinet d'être entraîné par le mouvement du tambour.

« La chaleur produite était évaluée par trois procédés, et notamment par l'échauffement de l'eau contenue dans le tambour.

« L'auteur a obtenu ainsi pour l'équivalent mécanique trente-deux valeurs qui s'accordent bien ensemble, puisque les nombres extrêmes sont 359 et 382. La moyenne a été $E = 372$ kilogrammètres ¹. »

2. On trouve encore dans les *Recherches sur l'équivalent de la chaleur* (p. 86) une nouvelle série d'expériences exécutées en faisant tourner de l'eau entre deux cylindres dont l'un était fixe, pendant que l'autre, le cylindre intérieur, tournait en entraînant le liquide. Huit déterminations différentes, variant de 398 à 466, lui ont donné pour moyenne $E = 422$ kilogrammètres.

3. Enfin, dans la nouvelle édition de sa *Théorie mécanique de la chaleur*², l'auteur cite encore (p. 55) six expériences consécutives faites sur l'eau, et qui lui ont donné, pour la valeur de l'équivalent, $E = 432$ kilogrammètres.

4. C'est encore au frottement qu'il faut attribuer le dégagement

¹ *Recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur*, p. 127; Paris, Mallet-Ba-

chelier, 1858. — ² Paris, Gauthier-Villars, 1865.

de la chaleur dans l'écoulement de l'eau sous de fortes pressions. M. Hirn rapporte, page 56 du même ouvrage, les expériences qu'il a faites de cette manière et qui lui ont donné pour résultat moyen $E = 433$.

2° EXPÉRIENCES DE M. FAVRE (1858)¹.

M. Favre a étudié la chaleur développée dans le frottement de l'acier sur lui-même. L'appareil à frottement était renfermé dans le calorimètre à mercure de Favre et Silberman, qui mesurait la chaleur produite. Le travail consommé était mesuré à l'extérieur du calorimètre par la chute du poids qui mettait l'appareil en mouvement. Des expériences très-concordantes, dont l'auteur ne donne pas le détail, lui ont fourni, pour la valeur moyenne de l'équivalent de 1 calorie, $E = 413$ kilogrammètres.

§ 4. DÉVELOPPEMENT DE CHALEUR DANS LA DÉSAGRÉGATION DES CORPS.

M. Hirn a étudié ce phénomène dans des expériences qui forment la seconde série de celles qu'il a présentées à l'Académie de Berlin en 1857. J'emprunte encore pour en rendre compte les propres paroles de M. Clausius²:

« Des morceaux de différents métaux, pourvus chacun à l'avance d'un trou cylindrique, étaient placés dans un calorimètre où ils se trouvaient ensuite fixés. La pièce métallique, soumise à l'action d'un foret vertical, pouvait pivoter autour d'un axe, vertical aussi, faisant suite à celui du foret; elle était retenue à l'aide d'un levier horizontal dont l'extrémité était tirée par une ficelle passant par-dessus des poulies convenablement disposées, de manière que l'on pût peser l'effort nécessaire pour maintenir le levier. La force consommée par le forage se trouvait ainsi exactement évaluée.

« L'auteur n'indique pas séparément les divers résultats de

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XLVI, p. 337.

² *Recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur*, p. 127.

cette série d'expériences; il n'en donne que la moyenne, qui est de 425 kilogrammètres. »

Quelque soin qu'on ait apporté à ces recherches, elles n'ont pu aboutir que par hasard à une valeur exacte de l'équivalent. Le principe de la méthode est évidemment défectueux, car ici le cycle ne peut pas être fermé, le corps soumis à l'expérience subissant forcément une altération dans son état; cette altération a consommé un travail qu'il aurait fallu évaluer, ce qui était impossible. Cette critique s'adresse également à l'expérience suivante.

§ 5. DÉVELOPPEMENT DE CHALEUR DANS L'ÉCRASEMENT DU PLOMB.

M. Ch. Laboulaye avait cru pouvoir déduire, d'expériences faites sur l'échauffement du plomb sous le choc d'un mouton, que l'équivalent mécanique de la chaleur était de 187 kilogrammètres¹. Ce nombre est certainement trop petit.

M. Hirn a repris ces expériences². L'appareil qu'il a employé ressemble fort à un pendule balistique; il permettait de mesurer très-exactement le travail détruit. L'échauffement du plomb se mesurait aussi avec facilité. La moyenne de six expériences très-concordantes a été $E = 425$ kilogrammètres.

Il n'y a rien à dire contre ces expériences, si ce n'est qu'elles pèchent par la base : le cycle n'est encore pas fermé; la déformation du plomb a consommé un travail qui n'a pas pu être évalué, et la méthode n'était pas plus propre que la précédente à fournir une mesure exacte de l'équivalent.

§ 6. CORRÉLATION DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES.

M. Masson a comparé l'allongement d'un corps par la chaleur à celui qu'il produit par la traction, et il a trouvé qu'une même

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XLVI, p. 773.

² *Théorie mécanique de la chaleur*, 2^e édition, p. 59.

quantité de chaleur produisait toujours un même effet mécanique¹. On peut en conclure l'équivalent mécanique de la chaleur².

M. Person, partant de cette idée juste, que la chaleur latente de fusion est de la chaleur transformée en travail moléculaire, et que la même quantité de chaleur produit la même quantité de travail, est arrivé à établir, par des raisonnements qui ne sont que spécieux, la proportionnalité des chaleurs latentes aux coefficients d'élasticité³.

Il ne faut voir, dans les formules établies par ces deux physiciens, que des relations empiriques démontrées approximativement par l'expérience, mais qu'il est impossible de déduire d'aucune théorie exacte⁴.

¹ *Journal de l'Institut*, t. II, p. 265; 1843.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. LIII, p. 257; 1858.

³ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XXIV, p. 265; 1848.

⁴ Verdet, *Exposé de la théorie mécanique de la chaleur*, p. 133, note 6.

CHAPITRE II.

THÉORIE DES VAPEURS.

§ 1^{er}. LOI DES CHALEURS LATENTES.

(M. Regnault, 1845.)

Les recherches de M. Regnault sur les chaleurs latentes (communiquées à l'Académie dans la séance du 15 décembre 1845) doivent être mises au premier rang de celles qui ont permis d'établir la théorie mécanique de la chaleur sur des bases expérimentales. Les mécaniciens avant lui admettaient avec Watt que la chaleur totale de la vapeur était constante : il en résultait que, dans la machine à vapeur, le condenseur devait rendre toute la chaleur qui avait été dépensée dans le foyer, et que le travail de la machine n'était accompagné d'aucune destruction de calorique. Les expériences de M. Regnault ont démontré d'une manière certaine que les choses ne se passaient pas ainsi; que la chaleur totale des vapeurs diminuait avec la température, et que par conséquent, dans les machines à vapeur, la chaleur empruntée au foyer ne se retrouvait plus tout entière dans le condenseur. Une partie de cette chaleur avait donc été détruite par le travail de la machine. Avant l'établissement de la véritable loi des chaleurs latentes, la production du travail dans la machine à vapeur était un mystère et un embarras pour la nouvelle théorie, tandis que maintenant elle en est une éclatante confirmation.

Malgré l'importance de ces recherches, je ne crois pas devoir les exposer ici, parce qu'elles doivent trouver place dans le rapport consacré à l'étude purement expérimentale de la chaleur.

§ 2. CONSOMMATION DU CALORIQUE DANS LA MACHINE À VAPEUR.

(M. Hirn, 1857.)

La mesure de l'équivalent mécanique de la chaleur dans la machine à vapeur fait l'objet de la troisième partie du travail couronné par l'Académie de Berlin (1857).

« Dans ces expériences, que je regarde comme les plus importantes, dit M. Clausius¹, on a évalué la chaleur qu'il fallait communiquer à la vapeur pour l'amener à l'état dans lequel elle se rend aux cylindres, et celle qu'elle cède ensuite à l'eau de condensation.

« Des expériences de ce genre sont d'une difficulté extraordinaire, surtout quand on les exécute, comme l'auteur, sur des machines de la force de plus de 100 chevaux. Il a su vaincre en partie ces difficultés par la disposition convenable et habile de ses procédés et les soins apportés dans leur exécution; il ne s'est pas limité au mode réglé de marche d'une machine, mais en a fait varier de plusieurs manières les conditions de travail.

« Il a fait ses essais sur deux machines, l'une à un seul cylindre, et l'autre du système Woolf, à deux cylindres, où la vapeur, après avoir agi à pleine pression sur le piston du petit cylindre, allait agir par détente sur le piston du grand.

« Les deux machines marchaient tantôt à l'aide de vapeur saturée, tantôt à l'aide de vapeur surchauffée à 250° environ; les cylindres de la machine Woolf étaient pourvus d'une enveloppe remplie, soit d'air, soit de vapeur saturée ou surchauffée.

« Il serait trop long d'entrer dans le détail de ces expériences. Je dirai seulement qu'elles ont fourni beaucoup de résultats aussi intéressants en eux-mêmes qu'importants quant aux fonctions de la machine à vapeur. Une des données qui touchent de plus près au problème posé, c'est que la vapeur, après avoir fourni du tra-

¹ *Recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur*, édition de 1858, p. 130. (Rapport de M. Clausius.)

vail dans les cylindres, rend à l'eau de condensation moins de chaleur qu'elle n'en avait reçu de la chaudière, toute déduction faite des pertes accessoires qu'elle a pu subir en route. Ce fait, qui, à la vérité, était nécessaire théoriquement¹, mais sans avoir été, à ma connaissance du moins, prouvé par aucune expérience, est ici mis hors de doute.

« Le travail fourni par la machine pendant la durée des essais était déterminé, tant à l'aide du frein de Prony qu'avec l'indicateur de Watt. Des recherches spéciales ont été faites pour évaluer la force disponible de la vapeur dans les cylindres.

« En comparant le travail produit avec la chaleur dépensée, l'auteur est tombé dans une singulière et manifeste erreur. Il admet que le travail fourni par l'expansion coûte seul du calorique, et par suite il calcule l'équivalent mécanique en divisant cette partie du travail total par la quantité totale du calorique disparu. Il s'ensuit tout naturellement que les nombres obtenus devaient être trop petits et varier beaucoup, le rapport entre le travail de la détente et le travail total n'ayant pas toujours été le même.

« Ce qui prouve que cette manière de voir est en opposition complète avec la théorie mécanique de la chaleur, c'est qu'elle conduit ainsi à admettre que, dans une machine à vapeur sans détente, le travail est produit sans consommation de chaleur.

« Il est facile de montrer comment l'auteur est tombé dans cette erreur. Pour justifier son point de départ, il dit que, lorsque la vapeur se condense à la pression sous laquelle elle s'est formée, elle rend autant de calorique qu'il en avait fallu dépenser pour la produire. Cet énoncé est tout à fait juste, mais ne trouve pas son application dans la machine à vapeur.

« Quand, dans une machine sans détente, la vapeur a complète-

¹ Ajoutons surtout qu'il était une conséquence nécessaire des expériences de M. Regnault, exécutées depuis douze ans, et de la formule empirique par laquelle

cet éminent physicien en avait représenté les résultats numériques, formule bien connue de M. Hirn, et rappelée par lui en tête de son mémoire (p. 20).

ment rempli le cylindre d'un côté du piston, et qu'elle se trouve ensuite mise en rapport avec le condenseur, la première portion seule de cette vapeur s'y précipite sous la pression initiale, puis la tension diminue de plus en plus. L'expansion qu'éprouve la vapeur dans le cylindre détermine un refroidissement tel que, si elle n'est point surchauffée ou ne reçoit point de chaleur, une portion s'y condense déjà. Pour que la condition formelle de l'énoncé ci-dessus pût être remplie, il faudrait que le piston avançât assez rapidement pour maintenir dans le cylindre la pression initiale. Mais dans ce cas la contre-pression qu'il aurait à surmonter serait précisément égale à la pression qui le pousse en avant, et l'on ne pourrait recueillir aucun travail externe. Si l'auteur avait étendu ses recherches à une machine sans détente, il eût sans doute trouvé aussi que la quantité de calorique s'échappant avec l'eau de condensation est moindre que celle qu'on dépense à produire de la vapeur.

« J'ai essayé d'éliminer des résultats cette erreur; ce qui, il est vrai, n'a pu se faire que très-imparfaitement. Les résultats corrigés m'ont fourni neuf déterminations nouvelles de l'équivalent mécanique de la chaleur, dont la moyenne est $E = 413$.

« On voit que cette dernière moyenne s'accorde très-bien avec les nombres trouvés par M. Joule pour le frottement et avec ceux qui résultent des expériences de l'auteur lui-même.

« Parmi les valeurs isolées, quelques-unes, il est vrai, s'écartent notablement de cette moyenne. Ces écarts ne surprendront plus, si l'on songe aux difficultés de recherches semblables, ainsi qu'au grand nombre de circonstances éventuelles dont elles dépendent et dont on ne peut pas exactement tenir compte; et si l'on considère en outre que les nombres isolés n'ont pas été obtenus à l'aide d'un même procédé, mais que ces neuf chiffres sont le produit de six modes particuliers, selon lesquels fonctionnaient, dans des conditions de travail très-distinctes, deux machines de systèmes entièrement différents, en sorte que presque à chaque nouvelle expérience intervenaient d'autres causes d'erreur.

« L'ensemble de ces résultats me paraît une belle confirmation des travaux de M. Joule, en même temps que le complément essentiel de toutes les observations faites jusqu'ici; parce que cette détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur est la première obtenue à l'aide d'une expérience où l'on ait converti, non la force en chaleur, mais la chaleur en force, et où le corps soumis à l'expérimentation soit revenu à son état primitif. En outre, ces résultats gagnent encore en intérêt quand on sait qu'ils sont dus à des expériences faites précisément sur la machine la plus employée dans la pratique pour la production de la force motrice à l'aide du calorique; machine qui, dans l'application de la théorie mécanique de la chaleur, garde ainsi l'importance du rang auquel elle s'était placée déjà, en servant à la démonstration de la théorie de Carnot. »

Après ce jugement, porté par l'homme le plus compétent, la science française a le droit de placer le mémoire de notre compatriote au premier rang des travaux de science expérimentale relatifs à la théorie mécanique de la chaleur.

Dans la nouvelle édition de son livre (1865), M. Hirn cite (p. 46) de nouvelles expériences, desquelles il résulte que, pour une même quantité de travail produit, il y a toujours la même quantité de chaleur détruite, et que, quelle que soit la manière dont travaille une machine à vapeur, que ce soit avec détente ou non, avec vapeur saturée ou avec vapeur surchauffée, on trouve toujours une proportionnalité exacte entre le travail rendu par le moteur et la perte de chaleur qu'éprouve la vapeur en passant de la chaudière au condenseur.

§ 3. CONDENSATION DE LA VAPEUR DANS LA DÉTENTE.

(M. Hirn, 1853.)

La condensation de la vapeur d'eau dans la détente est une conséquence de la théorie mécanique de la chaleur. Ce sont

MM. Clausius et Rankine qui les premiers, en 1851, sont arrivés par l'analyse à la découverte de ce fait important. Au point de vue expérimental, c'est M. Hirn qui en a mis l'existence hors de doute en 1853, avant d'avoir eu connaissance des travaux des savants étrangers¹. Un cylindre de cuivre fermé par deux plaques de verre a été d'abord rempli de vapeur saturée et sèche, qui était aussi transparente que l'air ordinaire. En mettant cette vapeur en communication avec l'atmosphère, elle s'est échappée rapidement et s'est par là même détendue. Au même instant, à l'intérieur du cylindre, un nuage s'est formé; à la transparence a succédé l'opacité la plus complète, et la condensation dont la détente est accompagnée est devenue pour ainsi dire visible à l'observateur².

La publication du second volume des *Recherches* de M. Regnault (1862) a donné les éléments nécessaires pour appliquer l'équation de Clausius à d'autres vapeurs qu'à celle de l'eau. C'est ce qu'a fait M. Hirn pour la vapeur de sulfure de carbone et pour celle d'éther sulfurique. Le calcul lui a fait voir que la première se comportait comme la vapeur d'eau, et la seconde en sens inverse, c'est-à-dire que la vapeur de sulfure de carbone devait se condenser par la détente, tandis que celle d'éther sulfurique se liquéfiait par la compression. Il a encore vérifié ces deux faits dans des expériences publiées par le journal *le Cosmos*, du 10 avril 1863³.

Pour faire mieux apprécier toute l'importance de ces recherches il est bon de remarquer que ce n'est point comme savant, mais comme ingénieur, que M. Hirn a été amené à constater la condensation de la vapeur d'eau dans la détente. Le *Bulletin* n° 133 de la Société industrielle de Mulhouse, qui renferme la démonstration expérimentale de ce fait, contient surtout des expériences précieuses, qui constatent l'énorme différence de rendement d'une machine à détente marchant avec vapeur saturée, selon que le

¹ *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*, n° 133, p. 137.

² Verdet, *Exposé*, etc. p. 65.

³ *Théorie mécanique*, etc. 2^e éd. p. 141.

cylindre est simplement protégé par une enveloppe isolante ou qu'il est maintenu à une température constante par la vapeur elle-même, à son maximum de tension. Le rôle de l'enveloppe de Watt est ainsi bien mis en évidence, et M. Hirn démontre qu'elle produit une économie de plus de 20 pour 100 sur la consommation de la vapeur.

§ 4. DÉTENTE DES VAPEURS SATURÉES.

(M. Cazin, 1866.)

Les formules de la thermodynamique indiquaient qu'il existe pour chaque vapeur une température à laquelle cette vapeur saturée peut subir une détente ou une compression, sans cesser d'être saturée. Aux températures inférieures, la détente est accompagnée d'une condensation partielle, et la compression d'une surchauffe; aux températures supérieures, l'inverse a lieu. M. Cazin a fait construire, aux frais de l'Association scientifique, des appareils pour étudier ce genre de phénomène, et il a annoncé à l'Académie des sciences, au mois de janvier 1866, que la température limite cherchée était, pour le chloroforme, aux environs de 120°.

§ 5. THÉORIE DES VAPEURS SURCHAUFFÉES.

(M. Hirn, 1854.)

Les études de M. Hirn sur la surchauffe de la vapeur l'ont occupé de 1854 à 1863. On les trouvera *in extenso* dans les *Bulletins* n^{os} 138 et 139 de la Société industrielle de Mulhouse. Elles ont démontré l'économie considérable produite par l'emploi judicieux de la vapeur surchauffée.

Pour arriver à un résultat pratique et définitif, l'auteur a eu à vaincre une foule de difficultés très-grandes, et il a été conduit à introduire des modifications très-utiles dans la construction des machines à vapeur en général. Il a éprouvé des difficultés bien plus

grandes encore à faire accepter ses résultats comme vrais dans le monde industriel, et ce n'est qu'après douze années d'une lutte patiente qu'il a eu la satisfaction de voir ses assertions vérifiées, et confirmées officiellement dans un rapport de la Société industrielle.

Ses recherches l'ont conduit à étudier de très-près plusieurs des propriétés des vapeurs : densité des vapeurs surchauffées d'eau, d'éther, de sulfure de carbone, surchauffe spontanée, etc. C'est à ce genre d'expériences que se rapporte le mémoire publié récemment par l'auteur dans les *Annales de chimie et de physique*, cahier de janvier 1867.

Dans un autre travail, communiqué à l'Académie le 31 décembre 1866, et inséré au tome X des *Annales de chimie et de physique*, 4^e série, MM. Hirn et Cazin se sont proposé de résoudre le problème suivant :

Chercher expérimentalement la surchauffe nécessaire pour empêcher la vapeur de se condenser lorsqu'elle se détend, en donnant tout le travail externe dont elle est susceptible.

Les résultats de ces expériences confirment pleinement les propositions et les diverses lois auxquelles M. Hirn était arrivé par l'analyse mathématique appliquée à un certain nombre de phénomènes spéciaux bien étudiés.

Le chapitre III de la *Théorie mécanique* du savant ingénieur contient une théorie complète des vapeurs surchauffées. On y trouvera la démonstration de ce théorème singulier :

Quand une vapeur quelconque, saturée ou surchauffée, passe brusquement, et sans rendre de travail externe, d'un volume à un autre, le produit du volume par la pression est constant, comme si la vapeur était un gaz suivant la loi de Mariotte (avec cette différence toutefois qu'ici la température est variable).

Ce théorème se trouve démontré pour la première fois dans la première édition de la *Théorie mécanique de la chaleur* (1862). La démonstration est notablement modifiée dans la seconde édition

(1865). Enfin elle se trouve reprise sous une forme toute nouvelle dans la deuxième partie du mémoire inséré aux *Annales de chimie et de physique* (1867)¹.

En combinant ce théorème avec celui de Carnot, M. Hirn est parvenu à établir une théorie de la vapeur surchauffée dans laquelle il n'entre plus aucune hypothèse ni aucun terme empirique. Cette théorie s'est trouvée confirmée dans ses principales parties par M. Zeuner, le savant professeur de Zurich, qui, par une voie toute différente, est arrivé, de son côté, à des équations presque identiques à celles de M. Hirn.

¹ Ces trois démonstrations n'ont pas convaincu tout le monde. L'auteur de ce rapport croit devoir rappeler, à cette

occasion, que sa mission est d'exposer les travaux, et non de les juger.

CHAPITRE III.

THÉORIE DES GAZ.

§ 1^{er}. EXPÉRIENCES DE GAY-LUSSAC.

On trouve dans les *Mémoires de la Société d'Arcueil*¹ une ancienne expérience de Gay-Lussac qui est devenue célèbre. Ayant mis en communication un ballon plein de gaz avec un autre ballon vide de même capacité, il a remarqué que la température baissait dans le premier et montait dans le second, mais que ces deux variations de sens contraires étaient précisément égales. La portion de gaz qui se détendait dans le premier ballon se refroidissait, celle qui se comprimait en arrivant dans le ballon vide s'échauffait, et la masse totale qui avait changé de volume, sans produire aucun travail extérieur, ne changeait pas de température.

Le travail produit ou consommé dans les deux ballons étant peu considérable, il en était de même de la variation de température dans chaque ballon, qui ne s'éleva qu'à 0°,8 pour l'hydrogène, et à peu près à 0°,6 pour l'air, l'oxygène et l'acide carbonique. Gay-Lussac fait remarquer² que, si la compression du gaz dans le briquet à air produit un échauffement énorme, puisqu'on peut ainsi enflammer l'amadou, ce qui exige une température d'au moins 300°, la détente d'un gaz comprimé dans l'atmosphère doit produire un froid qui peut être très-grand, et il cite, à l'appui de son assertion, l'expérience qu'il montrait chaque année dans son cours de la faculté des sciences, expérience dans laquelle l'air comprimé sous la pression

¹ t. I, p. 180; 1806. — ² *Annales de chimie et de physique*, 2^e série, t. IX, p. 308; 1818.

de deux ou trois atmosphères absorbait, en s'échappant dans l'atmosphère, assez de chaleur pour produire la congélation de la vapeur d'eau qu'il contenait.

Les résultats de l'expérience de Gay-Lussac peuvent s'exprimer, dans le langage de la science moderne, sous une forme à la fois très-simple et très-nette : toutes les fois que les changements de volume d'une masse gazeuse ne sont pas accompagnés d'un travail extérieur, il n'en résulte pas de variation de température; et, puisque la production du travail interne seule ne donne lieu à aucune destruction de chaleur, il faut en conclure que ce travail interne est nul dans les gaz.

Après avoir été reprises et confirmées en Angleterre par M. Joule, les expériences de Gay-Lussac ont été l'objet d'une étude attentive de la part de M. Regnault¹. Dans le nouveau volume dont cet éminent physicien va bientôt enrichir la science, et qui formera la 3^e série de ses études sur la chaleur, on trouvera des recherches du plus haut intérêt sur la chaleur spécifique des gaz à volume constant, sur la chaleur dégagée par leur compression, et sur les effets calorifiques de la détente et du mouvement des gaz. Ce mémoire a été présenté à l'Académie en 1854².

§ 2. DÉTERMINATION DE L'ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHALEUR.

On connaît pour les gaz, mais pour les gaz seulement, deux chaleurs spécifiques : la première, qu'on appelle *chaleur spécifique à pression constante*, est la quantité de chaleur nécessaire pour échauffer un mètre cube de gaz d'un degré en le laissant se dilater sous sa pression primitive; la seconde, qui a reçu le nom de *chaleur spécifique à volume constant*, est la quantité de chaleur qu'il faut donner à ce gaz pour l'échauffer également d'un degré, mais en l'empêchant de se dilater. La première de ces deux quantités de

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXXVI, p. 676.

² *Comptes rendus*, etc. t. XXXVIII, p. 853.

chaleur est plus grande que la seconde, et il est clair que leur différence est précisément la chaleur détruite ou transformée dans le travail de la dilatation. Le travail interne étant nul dans les gaz d'après l'expérience de Gay-Lussac, la différence de leurs chaleurs spécifiques est exactement l'équivalent du travail externe seulement, travail qui est égal au produit de la pression par le coefficient de dilatation. On aura donc l'équivalent mécanique de la chaleur, en divisant, par la différence des deux chaleurs spécifiques d'un gaz, le produit de la pression atmosphérique par le coefficient de dilatation du gaz.

Cette méthode si simple de calculer l'équivalent mécanique de la chaleur est due à Mayer (1842). Avec les coefficients connus de son temps, elle lui a donné un équivalent trop petit : $E = 365$.

Depuis cette époque, les expériences si précises de M. Regnault nous ont fourni une détermination plus exacte de deux de ces coefficients, la dilatation et la chaleur spécifique à pression constante. Le travail qu'il publie en ce moment sur la vitesse du son apportera peut-être quelques changements sur la capacité à volume constant qui dépend de cette vitesse ; mais pour le moment le calcul de Mayer doit s'établir de la manière suivante :

Un mètre cube d'air soumis à la pression atmosphérique supporte une pression de 10333 kilogrammes par mètre carré ; un échauffement d'un degré le dilate de 3665 millionièmes de son volume, de sorte qu'il produit un travail extérieur égal au produit de ces deux nombres ou à $37^{m},87$. Or, pour échauffer ce mètre cube d'air d'un degré, il faut lui donner $\frac{2,07}{1,07}$ de calorie lorsqu'il se dilate, et seulement $\frac{2,07}{1,07}$ lorsqu'on l'empêche de se dilater : différence $\frac{0,07}{1,07}$. En divisant par ce nombre le travail produit, on trouve, pour l'équivalent mécanique de 1 calorie, $E = 425$ kilogrammètres.

Le rapport inverse ou l'équivalent calorifique du kilogrammètre est $A = \frac{1}{425}$ de calorie.

Ce coefficient fondamental n'est plus entaché que de la petite

incertitude qui peut encore subsister sur la chaleur spécifique à volume constant, ou, ce qui revient au même, sur le rapport des deux chaleurs spécifiques.

Il semble qu'il repose sur une hypothèse, la nullité du travail interne, dont l'expérience de Gay-Lussac ne fournit peut-être pas une démonstration suffisante; mais il n'en est rien. On sait comment on peut éliminer le travail interne en faisant parcourir au gaz un cycle fermé; on trouve alors la même expression analytique de l'équivalent. C'est ce qu'a démontré M. Bourget d'une manière élémentaire, dans l'excellent mémoire qu'il a publié en 1859, dans les *Annales de chimie et de physique*¹, et qui renferme une théorie complète des gaz et des machines à gaz. Il est vrai que, dans le calcul du cycle fermé, M. Bourget s'appuie sur la loi de Mariotte, et que, si le gaz ne suivait pas cette loi, le calcul serait différent. Il en faut conclure que la loi de Mariotte suppose implicitement que le travail interne est nul dans les gaz qui lui sont soumis, et que la formule de Mariotte est l'expression par laquelle s'introduit dans le calcul l'hypothèse de la nullité du travail interne.

Mais la loi de Mariotte définit un état gazeux parfait, qui n'existe pas; tous les gaz s'en écartent plus ou moins, et voilà pourquoi le calcul de l'équivalent, appliqué à chacun d'eux, donne des résultats différents. On voit encore ici quel service signalé les expériences de M. Regnault ont rendu à la théorie mécanique. Lorsque ses investigations si délicates ont mis en évidence les écarts de la loi de Mariotte, des esprits chagrins ont pu voir disparaître avec douleur une loi dont la simplicité les charmait; mais si les perturbations qu'elle subit dans les gaz n'étaient pas prouvées, nous ne saurions à quoi attribuer les différences que nous présente le calcul de l'équivalent appliqué aux différents gaz; le principe de l'équivalent serait faux expérimentalement, et la théorie mécanique de la chaleur pécherait par sa base.

Ajoutons, pour ne pas laisser cet article trop incomplet, que de

¹ 3^e série. t. LVI, p. 257.

récents travaux accomplis à l'étranger par MM. Joule et Thompson (1854) ont démontré expérimentalement que le travail interne, quoique petit dans les gaz, n'est pas nul, et qu'il s'élève à $\frac{1}{5.5}$ du travail extérieur dans l'air, à $\frac{1}{3.7}$ dans l'acide carbonique. Il est donc d'autant plus grand que le gaz s'écarte plus de la loi de Mariotte, et, par conséquent, dans tous les gaz, il est une fraction du travail extérieur d'autant plus grande que la variation de volume est plus considérable.

L'absence de travail intérieur dans les gaz parfaits suppose que leurs molécules sont à des distances telles que les forces moléculaires sont insensibles, et alors on ne peut guère se rendre compte des propriétés des gaz qu'en admettant que ces molécules sont en mouvement et produisent par leur choc le phénomène de la pression. Cette hypothèse, dont l'idée première est due à Bernoulli, a été développée récemment, mais seulement à l'étranger. Je n'ai donc pas à en parler ici; je renvoie le lecteur qui veut se mettre au courant de cette théorie aux ouvrages spéciaux et particulièrement à l'*Exposé* de M. Verdet, page 138.

§ 3. DÉTENTE DES GAZ.

On a vu que des trois coefficients qui entrent dans le calcul de la théorie mécanique de la chaleur, il n'y en a que deux que l'on ait pu déterminer directement. La mesure du troisième, de la chaleur spécifique à volume constant, ou, ce qui revient au même, la mesure du rapport des deux chaleurs spécifiques, présente de très-grandes difficultés. On ne peut l'obtenir que par deux méthodes, toutes deux indirectes.

La première consiste à la déduire de la vitesse du son. Laplace a montré, en effet, que cette vitesse était proportionnelle à la racine carrée du rapport des deux chaleurs spécifiques; mais sa démonstration prouve en même temps que la vitesse du son est constante. Les expériences récentes de M. Regnault montrant que cette

vitesse subit des variations sensibles avec l'intensité du mouvement vibratoire, il y aura lieu, dès que ces expériences seront publiées, de reprendre la formule de Laplace et d'en tirer définitivement la valeur la plus probable du rapport tant cherché.

Une seconde méthode, plus directe que la précédente, pour trouver le rapport des deux chaleurs spécifiques des gaz, repose sur la loi de leur détente : quand un gaz augmente de volume, si on lui fournit de la chaleur, de manière à maintenir sa température constante, sa pression varie en raison inverse du volume, de telle sorte que le produit du volume par la pression est constant. Telle est la loi de la détente à température constante, connue sous le nom de *loi de Mariotte*. Mais si l'on ne fournit pas de chaleur et si le gaz est renfermé dans une enveloppe imperméable, de telle sorte qu'il ne puisse ni en prendre ni en céder aux parois, la détente sera accompagnée d'un abaissement de température; la pression ne sera plus en raison inverse du volume, elle variera suivant cette autre loi : le produit de la pression par le volume élevé à une puissance dont l'exposant est le rapport des chaleurs spécifiques sera constant. Telle est la formule de la détente à chaleur constante, connue sous le nom de *loi de Poisson*.

La détente des gaz à chaleur constante nous fournit donc un moyen de déterminer le rapport de leurs chaleurs spécifiques, et ce moyen est en apparence facile. Mais en réalité l'expérience présente de très-grandes difficultés, par suite de l'impossibilité où nous sommes d'empêcher les échanges de chaleur entre le gaz et les parois du vase qui le renferme; quand bien même ces échanges pourraient être complètement évités, la détente des gaz ne serait pas encore un phénomène aussi simple que l'indique la formule de Poisson, car cette formule suppose la loi de Mariotte, dont les gaz s'écartent tous plus ou moins.

La détente des gaz a fait l'objet d'un grand travail de M. Cazin, inséré dans les *Annales de chimie et de physique*¹. Il en résulte que la

¹ T. LVI, p. 206; 1862.

loi de Poisson n'est applicable aux gaz que si l'excès de pression qui produit la détente est peu considérable. Mais lorsque le gaz s'échappe d'un réservoir sous une charge considérable, il ne suit plus la loi de Poisson, sa densité décroît plus rapidement que ne l'indique cette loi. L'application des résultats numériques de ces expériences au calcul de l'équivalent mécanique de la chaleur conduit à un nombre très-peu différent du nombre 425, généralement adopté.

La même question a été traitée plus récemment par MM. Tresca et Laboulaye. Leurs recherches, présentées à l'Académie en 1864¹, ont été l'objet d'un rapport très-favorable de M. Morin². En l'absence du mémoire original, c'est dans le rapport qu'il faut chercher l'indication du procédé suivi par les expérimentateurs.

Il consistait à comprimer l'air dans un réservoir de plus de 3 mètres cubes, et à laisser échapper cet air comprimé par un robinet pendant cinq secondes seulement. Il résultait de cet écoulement une variation de pression, qui était produite à la fois par la diminution de la masse gazeuse et par l'abaissement de sa température. Le refroidissement, il est vrai, était contre-balancé par le réchauffement dû au contact des parois; mais on pouvait tenir compte de cette cause d'erreur en observant l'augmentation de pression du gaz depuis le moment où le robinet avait été fermé jusqu'à celui où le contact des parois lui avait rendu sa température primitive. On avait ainsi les éléments nécessaires au calcul de la correction.

Dans ces expériences, la formule de Poisson a été vérifiée dans des limites beaucoup plus étendues qu'elle ne l'avait été précédemment, et l'équivalent mécanique de la chaleur a été fixé à 433. Si l'on adoptait ce nombre, il faudrait diminuer un peu le rapport des deux chaleurs spécifiques; le chiffre des centièmes, dans ce

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. LVIII, p. 358.

² *Comptes rendus*, etc. t. LX, p. 326; 1865.

rapport, devrait être abaissé d'une unité, et la vitesse du son diminuée d'un mètre. Ces changements sont certainement très-acceptables; mais, avant d'arrêter définitivement la valeur de coefficients si importants, il faut attendre les résultats dont la publication des expériences de M. Regnault va nous mettre en possession.

CHAPITRE IV.

APPLICATION DE LA THERMODYNAMIQUE AUX MACHINES.

Outre les applications aux machines à vapeur et à gaz qui ressortent immédiatement des travaux que nous venons d'exposer, nous devons encore citer les études faites sur quelques machines particulières, d'après les principes de la thermodynamique. La liste en serait sans doute fort longue si elle était complète; je regrette de n'avoir pu me procurer que les indications suivantes :

BOURGET. — Théorie des machines à air chaud. (*Annales de chimie et de physique*, t. LVI, p. 277.)

HURN. — Théorie de la machine Lenoir. (*Cosmos*, 1862.)

CAZIN. — Théorie de la machine Lenoir. (*Cosmos*, 1863.)

Théorie de la machine Hugon. (*Les Mondes*, 1863.)

Théorie du compresseur hydraulique du tunnel des Alpes. (*Les Mondes*, 1863.)

Théorie élémentaire des machines à air chaud. (*Annales du Conservatoire des arts et métiers*, avril 1865.)

CHAPITRE V.

APPLICATION DE LA THERMODYNAMIQUE A LA PHYSIOLOGIE.

§ 1^{er}. CONSOMMATION DE CHALEUR DANS LE CORPS HUMAIN.

(M. Hirn, 1857.)

Les expériences de M. Hirn sur ce sujet forment la quatrième série de celles qu'il a présentées en 1857 à l'Académie de Berlin. Elles ont consisté à renfermer dans un espace clos un homme, qui demeurerait d'abord en repos pendant un certain temps, et exécutait ensuite un travail en élevant sans cesse son propre corps sur la circonférence d'une roue mobile, et à observer dans les deux cas les effets calorifiques et chimiques de la respiration. Connaissant le nombre de tours de la roue et le poids de la personne soumise à l'expérience, on avait le travail exécuté. Deux tuyaux de caoutchouc, terminés par un appareil à soupape que l'on tenait à la bouche, servaient, l'un à chercher l'air nécessaire à la respiration dans un gazomètre jaugé, l'autre à ramener l'air exhalé dans un second gazomètre jaugé aussi : l'air inspiré et l'air expiré étant analysés avec soin, on connaissait le poids d'oxygène consommé dans l'acte de la respiration. Le sujet soumis à l'expérience était renfermé dans une guérite dont la température était donnée par des thermomètres : quand cette température était constante, il y avait équilibre entre la chaleur produite dans l'organisme et celle qui était perdue par rayonnement, cette dernière étant proportionnelle à l'excès de température de la guérite sur celle de l'air extérieur. Pour déterminer le coefficient de proportionnalité, on faisait brûler dans la guérite un bec alimenté par un

courant régulier d'hydrogène, et on réglait l'écoulement de manière à avoir une température stationnaire : la perte dans l'unité de temps était alors égale à la chaleur produite par la combustion du gaz, laquelle est parfaitement connue. Cette quantité de chaleur et celle produite dans l'acte de la respiration étaient entre elles comme les excès de température de la guérite dans les deux cas.

On connaissait donc et la chaleur produite par l'homme soumis à l'expérience et l'oxygène qu'il avait absorbé. Au repos, ces deux quantités sont proportionnelles : la consommation de 1 gramme d'oxygène produit toujours 5 calories, à très-peu de chose près, quels que soient l'état de santé, l'âge de l'individu, etc.

Mais lorsque l'homme produit ou reçoit du travail mécanique, il n'en est plus ainsi.

Lorsqu'il gravit une montagne ou un escalier, lorsqu'il produit un travail mécanique quelconque, il consomme plus d'oxygène et produit notablement plus de chaleur dans chaque unité de temps. Mais la chaleur correspondante à 1 gramme d'oxygène est bien moindre que pendant le repos : elle est par exemple de 2 calories seulement au lieu de 5. Il y a donc perte d'une portion de la chaleur produite par la respiration. Dans l'exemple cité, 3 calories ont disparu. Que sont-elles devenues ? Cette chaleur, en apparence détruite, a été transformée en travail de toute espèce, travail externe de soulèvement d'un poids, travail interne moléculaire de nature inconnue, qui n'existait pas à l'état de repos. L'existence de ce travail moléculaire ne permet pas de comparer la chaleur disparue au travail extérieur pour en déduire l'équivalent mécanique, comme a voulu le faire M. Hirn ; mais la transformation de la chaleur en travail apparaît ici d'une manière évidente, et nous force de reconnaître que la machine humaine, si compliquée, est assujettie aux lois générales qui régissent toutes les machines thermiques.

Un phénomène inverse s'observe quand l'homme reçoit du travail au lieu d'en produire, quand il descend une montagne,

par exemple. Chaque gramme d'oxygène consommé produit alors plus de 5 calories. Cet excès de chaleur, qui n'est pas dû à l'action chimique, doit être attribué à la consommation du travail mécanique extérieur.

§ 2. CHALEUR PRODUITE DANS LA CONTRACTION DES MUSCLES.

(M. Bérard, 1860.)

M. Bérard a envisagé la question d'une autre manière, et démontré la transformation de la chaleur en travail par une expérience qui est à la portée de quiconque possède un bon thermomètre à mercure¹.

On savait, depuis les travaux de M. Becquerel, qu'il se développe une certaine quantité de chaleur dans le sein des muscles au moment où ils se contractent. Mais cette contraction peut avoir lieu de deux manières différentes, d'où résultent des effets calorifiques différents. La température des muscles étant appréciée au travers des téguments à l'aide de thermomètres gradués en cinquantièmes de degré centigrade, on peut, par la contraction, faire éprouver à la colonne thermométrique des excursions de 50, 60, 80 divisions; ce qui donne un champ assez étendu aux expériences de comparaison.

Or il arrive toujours que, lorsque dans la contraction musculaire on soulève un poids, on produit un effet mécanique extérieur, l'échauffement du muscle, la variation du thermomètre, sont bien moindres que lorsque la contraction n'est pas accompagnée de travail extérieur. M. Bérard en tire cette conclusion fort juste, que la contraction musculaire n'est pas une source de chaleur à la manière dont les physiologistes le pensent, mais qu'il n'y a que la partie de la force musculaire non utilisée comme travail mécanique qui apparaisse sous forme de chaleur.

¹ *Comptes rendus*, etc. t. L, p. 471; 1860.

CHAPITRE VI.

APPLICATION DE LA THERMODYNAMIQUE A L'ÉLECTRICITÉ.

§ 1^{er}. CHALEUR PRODUITE PAR L'INFLUENCE DE L'AIMANT
SUR LES CORPS EN MOUVEMENT.

(M. Foucault, 1855.)

Toutes les fois qu'un circuit fermé se meut devant un aimant, il se produit dans ce circuit un courant induit dont le sens est tel que, par sa réaction sur l'aimant, il tend à gêner le mouvement qui l'a produit. Si le circuit est formé par une masse métallique, tel qu'un disque de cuivre, le courant induit pourra prendre une grande intensité, et l'on éprouvera une grande résistance pour faire mouvoir le disque devant un électro-aimant puissant : on sera obligé, pour produire ce mouvement, de fournir un certain travail dont l'équivalent se retrouvera dans la chaleur gagnée par le disque.

Tel est le principe de la belle expérience que M. Foucault a communiquée à l'Académie des sciences en 1855¹.

Le corps mobile est un tore ou un disque, tournant entre les pôles d'un fort électro-aimant. Quand l'appareil est lancé à toute vitesse, le courant de six couples de Bunsen, dirigé dans l'électro-aimant, éteint le mouvement en quelques secondes, comme si un frein invisible était appliqué au mobile. Si alors on pousse à la manivelle pour restituer à l'appareil le mouvement qu'il a perdu, on constate qu'il s'échauffe, et sa température monte en quelques minutes à 60°.

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences et de physique*, 3^e série, t. XLV, sciences, t. XLI, p. 450, et *Annales de* p. 316.

C'est là certainement le plus curieux exemple de la conversion du travail en chaleur, et il n'est pas étonnant que l'expérience de M. Foucault ait acquis rapidement une juste célébrité.

§ 2. CHALEUR ENGENDRÉE PAR UN COURANT QUI PRODUIT UN EFFET MÉCANIQUE.

(M. Favre, 1857.)

Dans son beau mémoire sur l'origine de la chaleur voltaïque¹, M. Favre avait clairement établi que cette chaleur est entièrement due à l'action chimique de la pile. Lorsque, en dehors de tout circuit voltaïque, il dissolvait dans l'acide sulfurique un équivalent ou 33 kilogrammes de zinc, il produisait toujours 18796 calories. Ces 18796 calories se retrouvaient toujours dans le circuit dès qu'un équivalent de zinc avait été dissous dans la pile; seulement elles y étaient inégalement réparties, chacun des conducteurs partiels qui formaient le circuit fermé en ayant reçu une quantité proportionnelle à sa résistance propre.

Il fut donc ainsi bien démontré que la chaleur dégagée dans la totalité du circuit était l'équivalent exact du travail des affinités; mais cette démonstration n'avait pu se faire que parce que toute la chaleur due à ce travail avait été employée à échauffer le circuit, sans que la moindre partie ait pu se transformer en travail extérieur. Mais si le courant avait produit un effet mécanique, ce travail extérieur aurait absorbé une partie de la chaleur due à l'action chimique; cette portion de chaleur disparue aurait dû être proportionnelle au travail produit, et l'on devait retrouver ainsi, par cette voie détournée, l'équivalent mécanique de la chaleur.

Cette recherche curieuse est l'objet du nouveau mémoire que M. Favre a présenté à l'Académie en 1857². L'ingénieux calorimètre de Favre et Silbermann lui a permis de mesurer avec précision les quantités de chaleur. Ce calorimètre, on le sait, n'est autre

¹ *Annales de chimie et de physique*, t. XL, p. 293; 1854.

² *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XLV, p. 56.

chose qu'un énorme thermomètre à mercure, dont le réservoir renferme deux moules où l'on peut introduire les corps dans lesquels on veut étudier le développement de la chaleur. Dans le premier moule M. Favre plaçait la pile, et dans le second une très-petite machine électro-magnétique, qui, par un mécanisme inutile à décrire, pouvait travailler à volonté, c'est-à-dire produire l'ascension d'un poids. Quand la machine ne travaillait pas, la chaleur produite dans tout le circuit, y compris la pile, était toujours de 18796 calories pour un équivalent de zinc dissous. Mais dès que la machine travaillait, ce nombre était moindre, et la différence était proportionnelle au travail produit. Chaque calorie disparue correspondait à un travail extérieur de 443 kilogrammètres. L'équivalent mécanique de la chaleur déduit de ces expériences est assez voisin de celui qu'on obtient par d'autres procédés, pour qu'on soit en droit d'attribuer la différence aux erreurs inévitables de l'observation.

§ 3. CONSOMMATION DE CHALEUR DANS LES MACHINES ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES.

(M. Leroux, 1857.)

Si dans l'expérience de M. Foucault on mesure à la fois et le travail nécessaire pour vaincre la résistance due à la réaction électro-magnétique, et la chaleur produite, on aura le moyen de déterminer l'équivalent mécanique de la chaleur.

Tel a été le but des recherches que M. Leroux a entreprises à l'aide des puissantes machines électro-magnétiques de la compagnie *Alliance*¹. Chacun connaît maintenant ces machines, qui sont devenues si précieuses pour la production de la lumière électrique. Elles consistent essentiellement en bobines d'induction tournant devant des aimants. Ce mouvement donne naissance à

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XLV, p. 414. — *Annales de*

chimie et de physique 3^e série, t. L, p. 473.

des courants induits, et ces courants eux-mêmes, en agissant sur les aimants qui les ont produits, tendent à arrêter le mouvement. Il fallait donc dépenser, pour maintenir la machine en marche, plus de travail quand le circuit était fermé que quand il ne l'était pas. La différence était le travail consommé pour produire le courant. Ce courant, à son tour, produisait de la chaleur, que l'on évaluait en mesurant celle qui était développée dans un fil de platine intercalé dans le circuit, et en multipliant cette chaleur par le rapport de la résistance totale à la résistance particulière de ce fil.

Trois expériences citées par l'auteur lui ont donné, pour l'équivalent mécanique de la chaleur, les nombres 442, 462 et 470, dont la moyenne est $E = 458$ kilogrammètres.

§ 4. ORIGINE DE LA CHALEUR VOLTAÏQUE.

(MM. E. Becquerel, Favre, J. Regnault, Marié-Davy.)

Les expériences que nous venons de rapporter établissent nettement l'équivalence de la chaleur voltaïque et du travail produit ou consommé par les courants. Dans la machine électro-magnétique de M. Leroux la chaleur était tout entière produite par le travail extérieur détruit. Lorsque le courant est fourni par une pile, il n'y a pas de travail extérieur consommé, mais il y a dans l'intérieur de la pile un travail moléculaire qui est exactement l'équivalent de la chaleur qui accompagne le courant. C'est ce qui ressort clairement des belles expériences par lesquelles M. Joule a montré que la chaleur produite dans un circuit voltaïque est proportionnelle au nombre d'atomes ou d'équivalents de zinc employés à produire le courant. Le courant ne fait que transporter la chaleur due à l'action chimique dans toutes les parties du circuit en la distribuant proportionnellement aux résistances de chaque partie¹.

¹ *Archives de l'électricité*, t. II, p. 54; 1842.

Thermodynamique.

Mais les expériences de M. Joule n'étaient peut-être ni assez nombreuses, ni assez précises pour établir d'une manière définitive une loi naturelle; elles présentaient d'ailleurs des lacunes qui, en enlevant à la loi sa généralité, diminuaient beaucoup son importance. Le beau mémoire du physicien anglais exigeait donc un complément, qui lui a été fourni par les travaux des physiciens français.

1° Tout d'abord la loi de la proportionnalité de la chaleur à la résistance, bien établie pour les conducteurs solides, était complètement en défaut quand on voulait l'appliquer aux conducteurs liquides. M. E. Becquerel a fait disparaître cette anomalie en montrant que la loi de Joule s'appliquait parfaitement aux conducteurs liquides, pourvu qu'on tint compte de la chaleur absorbée par la décomposition de ces conducteurs sous l'influence du courant¹.

2° M. Joule distinguait dans la pile deux actions chimiques : l'oxydation du zinc et la combinaison de l'oxyde de zinc avec l'acide sulfurique, et il supposait gratuitement que la première produisait seule la chaleur voltaïque, la seconde n'étant qu'un phénomène accessoire; de sorte que réellement la loi qui porte son nom allait bien au delà des expériences qui avaient la prétention de l'établir. C'est M. Favre qui a rendu à la démonstration expérimentale toute sa rigueur; c'est lui qui, après avoir établi que la double action chimique qui a lieu dans une pile formée par du zinc et du platine plongeant dans l'eau acidulée dégage 18796 calories par équivalent de zinc dissous, a montré que ces 18796 calories se retrouvaient intégralement dans le circuit de la pile².

La connaissance précise de la loi de Joule a permis à M. Favre de nous donner l'explication d'un fait singulier. L'expérience prouvait qu'on ne pouvait décomposer l'eau qu'avec certains éléments de pile et non avec d'autres. A quoi tenait cette différence? Elle

¹ *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. IX, p. 40; 1843.

² *Annales de chimie et de physique*, 3^e série, t. XL, p. 293; 1854.

tient simplement à la nécessité à laquelle est soumise toute machine de consommer un travail précisément égal à celui qu'elle produit. Pour décomposer un équivalent d'eau, il faut produire un travail moléculaire équivalent à 34462 calories, ce nombre représentant la chaleur dégagée dans la combustion d'un équivalent d'hydrogène. Mais en même temps que le courant décompose un équivalent d'eau, il se dissout un équivalent de zinc dans la pile. Il faut donc que la dissolution d'un équivalent de zinc dans le couple voltaïque se fasse dans des conditions telles, consomme un travail moléculaire tel, que cette dissolution dégage plus de 34462 calories. Or c'est ce qui n'a pas lieu dans le couple de Smée employé par M. Favre, où la chaleur mesurée n'est que de 18796 calories par équivalent de zinc dissous, ni dans le couple de Daniell, où la chaleur calculée ne s'élève qu'à 23653 calories; mais c'est ce qui a lieu dans le couple de Bunsen, où la chaleur dégagée est supérieure à 40000 calories. Voilà pourquoi on peut décomposer l'eau dans un voltamètre avec un seul couple de Bunsen, tandis qu'il faut au moins deux couples à un seul liquide, et deux couples de Daniell.

3° Il est une conséquence de la loi de Joule qui n'avait pas échappé à l'auteur de cette loi, mais qu'il n'avait pas appuyée sur des expériences directes, c'est que la force électromotrice d'un élément de pile est proportionnelle à la chaleur dégagée par la dissolution d'un équivalent de zinc dans cet élément, ou à ce qu'on devrait appeler l'*équivalent calorifique* de la pile.

On doit à M. Jules Regnault plusieurs vérifications de cette loi¹. Il montre d'abord que cette vérification a lieu d'une manière satisfaisante quand on compare les deux piles les plus employées, celle de Bunsen et celle de Daniell. Le rapport de leurs équivalents calorifiques et celui de leurs forces électromotrices sont sensiblement les mêmes. La substitution du zinc amalgamé au zinc pur augmentant la force électromotrice de la pile, la dissolution du zinc amalgamé

¹ *Recherches sur les forces électromotrices*, Paris, 1855.

doit dégager plus de chaleur que celle du zinc ordinaire, et M. Regnault en conclut que la formation de l'amalgame de zinc doit produire du froid. Au contraire, la substitution du cadmium amalgamé au cadmium pur diminuant la force électromotrice, l'amalgamation du cadmium doit produire de la chaleur. Ces deux prévisions ont été complètement vérifiées par l'expérience.

M. Gaugain a étendu cette remarque à un grand nombre d'amalgames et a fait voir que l'amalgamation pouvait produire des changements positifs, négatifs ou nuls dans la force électromotrice des couples dont les métaux amalgamés font partie ¹.

4° La proportionnalité de la force électromotrice de la pile à son équivalent calorifique était démontrée pour un bien petit nombre de couples : il fallait l'étendre au plus grand nombre possible de combinaisons voltaïques. Tel est le but que poursuit encore en ce moment M. Marié-Davy. Ses premières expériences sur ce sujet ont été faites en commun avec M. Troost². Il a pris soin de résumer lui-même ses divers travaux dans deux opuscules intitulés : *Recherches théoriques et expérimentales sur l'électricité considérée au point de vue mécanique* ³.

On y trouvera la mesure des forces électromotrices d'un grand nombre de piles formées par l'action de neuf acides sur trois bases et sur vingt-neuf métaux différents. Ces métaux sont loin d'être tous attaqués par les acides; aussi, au lieu d'effectuer des combinaisons, a-t-il fallu fréquemment en détruire pour mesurer la perte de force électromotrice produite par l'effet de ces actions inverses. Les deux méthodes ont d'ailleurs été simultanément employées pour un même corps toutes les fois qu'il a été possible de le faire.

Or, si l'on prend, parmi les résultats obtenus par M. Marié-Davy, ceux qui correspondent aux combinaisons chimiques dont la chaleur a été mesurée par MM. Favre et Silbermann, on trouve entre ces

¹ *Comptes rendus*, etc. t. XLII, p. 430; 1856.

troisième série, tome LIII, page 423; 1858.

² *Annales de chimie et de physique*,

³ Paris, 1861-1862.

nombres une concordance aussi grande que la nature du phénomène permet de l'espérer. L'état physique d'un métal exerce, en effet, une grande influence sur la quantité de chaleur qu'il dégage en se combinant avec les acides; cela est vrai pour l'aluminium, le manganèse et le fer, vrai encore, avec des différences moins grandes, pour le cobalt et le nickel.

La proportionnalité étant ainsi démontrée, on comprend qu'en choisissant convenablement les unités on doit arriver à l'identité, c'est-à-dire que la force électromotrice de la pile est alors exprimée par le même nombre que son équivalent calorifique. C'est ce qu'a montré M. Marié, dans la note communiquée à l'Académie, le 8 avril 1867. En prenant pour unité de courant celui qui, dans l'unité de temps, dépose un équivalent d'argent, et pour unité de résistance celle d'un conducteur qui, traversé par l'unité de courant, en reçoit une calorie dans l'unité de temps, la force électromotrice du couple de Smée employé par M. Favre se trouve être égale à 18763, tandis que l'équivalent calorifique du couple mesuré par ce physicien est 18796. Ces deux nombres doivent être considérés comme identiques.

La pile est une vraie machine dans laquelle le travail moteur fourni par l'action chimique et mesuré par l'équivalent calorifique du couple est consommé par les résistances passives du circuit. Dès que le courant est établi, son intensité croît rapidement, jusqu'à ce que l'égalité soit atteinte entre le travail moteur et le travail résistant. Cette égalité est toujours possible, parce que le travail moteur croît proportionnellement à la quantité de zinc dissoute dans l'unité de temps, et par suite proportionnellement à l'intensité du courant; tandis que le travail résistant croît comme le carré de cette intensité. Dans les conditions ordinaires, elle est atteinte au bout d'un temps très-court, que M. Marié-Davy estime à $\frac{1}{1000}$ de seconde.

La durée de l'état variable est prolongée lorsque le courant effectue un travail extérieur. Dans un de ses appareils électromagnétiques, M. Marié a trouvé que le travail extérieur s'élevait

jusqu'à 10 pour 100 du travail chimique, rendement qui serait supérieur à celui des meilleures machines à vapeur.

Comme dernier résultat curieux de ces recherches, citons encore celui-ci : le travail dépensé pour aimanter fortement un noyau de fer doux est extrêmement petit; car, transformé en chaleur, il ne pourrait élever que de $\frac{1}{1000}$ de degré seulement la température de ce noyau.

CHAPITRE VII.

PERFECTIONNEMENT DE LA THÉORIE MÉCANIQUE.

Telle qu'elle est actuellement constituée, la théorie mécanique de la chaleur repose sur deux théorèmes fondamentaux, qu'on peut appeler le *principe de Mayer* et le *principe de Carnot*.

Le premier est le principe même de l'équivalence : *la chaleur détruite est l'équivalent du travail produit, et réciproquement*. Cette proposition doit être considérée comme démontrée par l'expérience pour le travail extérieur dans tous les cycles fermés; mais il faut bien reconnaître que l'induction seule nous autorise à l'étendre au travail intérieur, qui échappe à toute détermination.

On ne peut faire passer un corps par un cycle fermé qu'en l'échauffant d'abord et le refroidissant ensuite. Dans la première opération, le corps reçoit de la chaleur et il produit du travail; dans la seconde, il détruit du travail et il rend de la chaleur. Lorsqu'il y aura un travail mécanique définitivement produit et recueilli en dehors de ce corps, la chaleur qu'il aura reçue sera toujours plus grande que la chaleur restituée, la chaleur *fournie* toujours plus grande que la chaleur *recueillie*, et la différence, qu'on appelle la *chaleur détruite*, est toujours proportionnelle au travail mécanique définitivement produit. Mais, en général, il n'y a aucun rapport constant entre ce travail et la chaleur fournie.

Il est un cas cependant où ce rapport est déterminé, c'est celui où le corps, en parcourant le cycle fermé, n'a jamais été en contact qu'avec des corps à la même température que lui ou qui en différeraient infiniment peu. Dans ce cas, toute la chaleur a été transformée en travail, sans que la moindre partie en ait été employée à produire de changement de température, et la machine est dans la condition du maximum de rendement.

Lorsque cette condition est satisfaite, la chaleur fournie et la chaleur recueillie sont entre elles comme les températures extrêmes entre lesquelles la machine fonctionne. On en conclut que *le travail produit est égal à la chaleur fournie, multipliée par l'équivalent mécanique et par le rapport de la différence des températures extrêmes à la température la plus élevée*. Les températures sont ici les températures *absolues*, en désignant par ce mot celles qu'on lirait sur un thermomètre dans lequel le point de fusion de la glace serait marqué 273°.

Telle est la seconde proposition de la théorie mécanique de la chaleur. Elle est aussi générale que la première, en ce sens qu'elle s'applique comme la première à tous les corps; mais elle suppose remplies certaines conditions dont la première n'a pas besoin. Au point de vue expérimental, la différence est bien plus marquée : le principe de Mayer peut être vérifié par l'expérience dans tous les cycles fermés; le principe de Carnot ne peut jamais l'être, parce que les conditions qu'il suppose satisfaites ne peuvent jamais l'être dans aucune expérience connue. On ne peut donc le vérifier expérimentalement que d'une manière détournée, c'est-à-dire dans ses conséquences : sa démonstration directe est absolument du domaine de la raison pure.

Cette démonstration a été donnée plusieurs fois. Dans les idées de Carnot, elle était fort simple; dans les idées modernes, elle est plus difficile; on peut lui reprocher de s'appuyer sur des principes dont l'évidence est contestable, par exemple sur celui-ci, qu'il n'est pas possible de porter de la chaleur d'un corps froid sur un corps chaud sans dépenser du travail. M. Hirn a voulu lever cette difficulté et établir le principe de Carnot sur des raisonnements indépendants de toute hypothèse. Sa démonstration, publiée dans *le Cosmos* de 1863, est reproduite dans la seconde édition de sa *Théorie mécanique de la chaleur* (p. 89); mais il faut espérer que ce ne sera pas là le dernier mot de la science sur un théorème aussi important.

Pour établir sa démonstration, M. Hirn est obligé d'introduire

dans ses calculs trois indéterminées, qu'il appelle la *chaleur spécifique absolue*, la *pression interne* et le *volume atomique*. C'est à l'aide de ces trois indéterminées qu'il a cherché à établir, dans le dernier livre de son ouvrage, les équations d'une seconde branche de la théorie mécanique, dont il me reste à faire comprendre la portée.

Des deux principes fondamentaux de Mayer et de Carnot, on a tiré trois équations générales qui fournissent la solution de tous les problèmes dans lesquels on a à comparer la chaleur avec le travail dynamique extérieur. Parmi ces équations, la première n'est pas autre chose que la traduction algébrique du premier principe fondamental. On l'obtient, en effet, en écrivant que la chaleur fournie à un corps est la somme de trois parties : celle qui échaufferait le corps sans produire de travail ni intérieur ni extérieur; celle qui produit le travail intérieur, et enfin celle qui produit le travail extérieur. Lorsque les changements subis par le corps forment un cycle fermé, les deux premières quantités se retrouvent intégralement; elles ne sortent pour ainsi dire pas du corps, et leur somme a reçu pour cette raison le nom de *chaleur interne*. Si l'on appelle *chaleur mécanique* ou *chaleur externe* celle qui est l'équivalent du travail mécanique extérieur, la première équation générale de la thermodynamique s'énonce simplement en langage ordinaire : *la chaleur fournie à un corps égale la chaleur interne, plus la chaleur mécanique*.

Il résulte de là une division naturelle de la théorie mécanique de la chaleur en deux branches distinctes. La première s'occupe plus spécialement des phénomènes relatifs de chaleur et de travail mécanique extérieur; elle constitue une science des plus avancées. La seconde branche s'occupera des phénomènes thermiques et dynamiques considérés dans les corps mêmes; elle constituera plus tard une science qui en ce moment est pour ainsi dire dans son enfance, mais qui certainement est riche d'avenir, si elle doit nous dévoiler le secret des actions moléculaires, aujourd'hui si mystérieuses.

CHAPITRE VIII.

EXPOSÉ DES TRAVAUX DE M. ATHANASE DUPRÉ SUR LA THÉORIE
MÉCANIQUE DE LA CHALEUR.§ 1^{er}. PREMIER PRINCIPE FONDAMENTAL.

Vers la fin de l'année 1859, M. Athanase Dupré a commencé, sur la théorie mécanique de la chaleur, des recherches continuées sans relâche depuis cette époque. Déjà le premier principe mis en avant par Montgolfier et Seguin, affirmé d'une manière plus précise par Mayer, était admis généralement par suite des expériences de MM. Joule, Regnault, Favre, Silbermann, Weber, Boscha, Hirn. Plusieurs auteurs recommandables prétendaient même le démontrer *à priori*, en s'appuyant sur des propositions données à tort comme évidentes, puisque des hommes éminents avaient admis pendant longtemps l'exactitude des propositions contraires. M. Dupré s'est placé tout de suite au nombre de ceux qui croient l'expérience seule capable de donner une base solide à la science nouvelle, mais qui admettent l'impossibilité d'attribuer au hasard les vérifications nombreuses et variées du principe de l'équivalence du travail et des forces vives moléculaires ou non moléculaires déjà obtenues. Considérant le principe comme certain dans toute la généralité que lui ont attribuée M. Grove et plusieurs autres savants distingués, il s'est appliqué à en déduire des conséquences, non-seulement pour les cas où il conduit à des équations renfermant des travaux ou des forces vives moléculaires, en même temps que des travaux et des forces vives des masses, mais aussi pour le cas particulier où ces

dernières quantités existent seules et qui se rattache à la théorie mécanique de la chaleur, comme l'équilibre se rattache au mouvement, à titre de cas particulier limite. M. Dupré a fait voir que le premier principe, envisagé à ce point de vue très-général, conduit à des démonstrations simples de la plupart des théorèmes de la mécanique; il en tire par exemple :

1° Le principe de l'égalité de l'action et de la réaction, en précisant les cas dans lesquels il est applicable;

2° Le principe de d'Alembert;

3° Le principe des vitesses virtuelles;

4° Les théorèmes sur les quantités de mouvement.

Il ne peut être aucunement question d'abandonner les démonstrations usitées en mécanique analytique; mais il est utile de montrer que, si le principe de la conservation du travail et des forces vives en l'absence de tout choc, considéré comme un cas particulier de celui de l'équivalence, résulte de leur ensemble, réciproquement il les renferme toutes implicitement. D'ailleurs, la méthode dans laquelle on prend les questions en sens inverse, dans laquelle on déduit les théorèmes du principe de l'équivalence, offre, dans beaucoup de cas, de très-grands avantages, parce qu'elle est plus simple et conduit facilement à des conséquences difficiles à apercevoir sans elle.

C'est en l'appliquant à l'étude du travail de séparation ou de réunion des corps, que M. Dupré a découvert son théorème fondamental de la capillarité, consistant en ce que, *abstraction faite des frottements, si la forme d'un corps change avec accroissement ou diminution de surface, un travail proportionnel à la variation est dépensé ou produit*. Ce travail très-petit, et qu'il est commode, à cause de cela, d'évaluer en prenant pour unité le millimètre et le milligramme au lieu du mètre et du kilogramme, demeure le même, soit que l'accroissement de surface ait lieu par la séparation nor-

Théorème
fondamental
de
la capillarité.

male de deux parties du corps terminées par une face plane commune, soit qu'elle ait lieu par voie de glissement de ces deux mêmes parties l'une sur l'autre. Dans ce second cas, si l'on suppose aux deux parties la forme de parallépipèdes rectangles, la force qui s'oppose au glissement ou qui le favorise dans le mouvement inverse, et qu'on nomme *force de réunion*, est, par unité de longueur de l'arête et avec les unités choisies, égale au travail de séparation par millimètre carré.

Force
de contraction
des couches
superficielles
liquides.

Du travail produit pendant un changement de forme quelconque, avec diminution de surface, M. Dupré conclut l'existence d'une force de contraction dans la couche superficielle des corps. Le travail et la force étant indépendants de la vitesse, il en résulte que cette tension existe même pendant le repos. En étudiant sa cause, qui tient à l'inégalité des attractions dans diverses directions près de la surface, M. Dupré fournit une seconde preuve théorique de son existence; il prouve qu'elle égale la force de réunion, et il arrive en même temps à plusieurs théorèmes relatifs à des quantités qui s'y rattachent; puis, dans un paragraphe dû à M. Massieu, il donne en outre pour chacun d'eux une démonstration basée sur le calcul direct des attractions. Dans les liquides, la force contractile des couches superficielles n'est point entravée par les frottements; admise depuis longtemps comme *hypothèse* dans la science, elle facilite beaucoup l'explication des phénomènes capillaires connus; elle est même indispensable pour l'explication de quelques-uns d'entre eux; enfin elle fait prévoir un grand nombre de lois qui ont été pour la plupart vérifiées par M. Dupré et son fils Paul, associé avec lui pour toute la partie expérimentale de ses travaux.

Dynamètre.

Dans la vérification du théorème fondamental, ces messieurs ont fait usage d'un appareil imaginé par eux pour leurs recherches commencées sur le magnétisme et l'électricité. Cet instrument,

qu'ils nomment un *dynamètre*¹, tient à la fois du pendule et de la balance; il donne la mesure d'un travail total sans qu'on ait besoin d'en connaître les facteurs à chaque instant et d'opérer une intégration. Bien construit, il permettra d'apprécier au moins les dix-millionièmes de kilogrammètre quand ce sera nécessaire, et rendra des services très-utiles et très-variés. Dans une première série d'expériences, l'appareil a servi à mesurer le travail dépensé ou produit pendant que monte ou descend un poids; ses indications ont été conformes aux résultats connus d'avance, à cela près de quantités négligeables. Après l'avoir soumis à ce contrôle, MM. Dupré l'ont employé pour mesurer le travail dépensé ou produit quand une lame plane du liquide glycérique de M. Plateau augmente ou diminue en surface. Les valeurs calculées par le théorème fondamental ont été toujours très-voisines de celles que l'instrument a fournies, et il en a été de même quand on l'a mis en rapport avec un autre appareil contenant un liquide non susceptible d'être réduit en lames, et disposé de telle sorte qu'on pouvait facilement mesurer les accroissements et les diminutions de surface, en même temps que le dynamètre donnait les travaux correspondants.

Après les preuves théoriques de son existence et la mesure du travail qu'elle produit, l'existence de la tension superficielle n'est nullement douteuse; MM. Dupré ont tenu cependant à montrer son action dans des expériences nombreuses et variées. Dans l'une d'elles, une lame glycérique plane agit comme un ressort élastique toujours également bandé. Dans une autre, on voit avec surprise l'une des parois verticales d'un vase peu profond, plein

¹ Cette expression se rattache au mot *dyne*, que M. Dupré propose pour remplacer celui de *kilogrammètre*, qui se prête mal à la formation des noms des multiples et des sous-multiples de l'unité de travail. Pour faciliter le langage et les calculs, il

propose aussi d'appeler *force vive* la moitié du produit de la masse par le carré de la vitesse; les équations dans lesquelles figurent constamment aujourd'hui des travaux et des forces vives rendraient ce changement très-commode.

d'un liquide qui le mouille, tourner autour de sa base et se jeter en dedans aussitôt qu'on brûle un fil qui la retient : ici la force contractile surmonte la pression hydrostatique, et l'on ne peut faire appel aux courbures pour expliquer le phénomène, car il est facile de réussir avec une surface entièrement plane ou avec une surface convexe vers les bords.

La mesure de la tension de la couche superficielle pour une section normale ayant 1 millimètre de longueur dans le sens de la surface a une importance considérable, non-seulement parce qu'elle conduit à l'explication précise des phénomènes capillaires, mais surtout parce que cette quantité égale la force ou le travail de réunion et fournit une donnée précieuse pour l'étude des lois de l'attraction à petites distances. Au moyen d'accessoires convenables ajoutés à un aréomètre ou à une balance, MM. Dupré sont parvenus à rendre les déterminations aussi faciles que celles des poids.

Lois
des attractions
à
petites distances.

Après la formation d'un tableau des résultats obtenus pour un assez grand nombre de substances, il a été possible, en appliquant le calcul à des groupes convenablement choisis, de trouver les forces de réunion de plusieurs corps simples, qu'il est impossible d'obtenir isolément à l'état liquide. M. Athanase Dupré, en les comparant avec celles du brome, du soufre, du mercure, de l'étain, etc. est arrivé à une première loi relative aux attractions à petites distances, sujet qui avait toujours paru inabordable. Un examen des faits connus lui a permis de constater que l'expression générale de la gravitation universelle se compose de trois parties, dont une seule est appréciable aux grandes distances, c'est le terme astronomique. Une seconde partie, le terme physique, devient négligeable dès que la distance surpasse une quantité extrêmement petite ($\frac{1}{100000}$ de millimètre, par exemple), encore assez mal déterminée, plus grande toutefois qu'une limite obtenue par lui et moindre qu'une seconde limite que l'on trouve par un procédé dû à M. Plateau. Ce second terme, lorsqu'il s'agit des attractions mu-

tuelles que les particules d'un même élément exercent les unes sur les autres, est inversement proportionnel à l'équivalent chimique, et ce résultat suffit pour condamner l'hypothèse séduisante de l'unité de la substance matérielle. Les particules de quelques corps simples différents se repoussent au lieu de s'attirer aux distances qui font prédominer le terme physique, et ce fait suffit pour faire comprendre pourquoi la décomposition des composés binaires formés par eux est accompagnée d'une production de chaleur. Enfin la troisième partie, le terme chimique, prédomine à son tour à des distances beaucoup moindres encore, ce qui rend possible la combinaison de deux éléments qui se repoussent aux distances pour lesquelles le terme physique est seul sensible. Lorsqu'il s'agit d'un corps simple agissant sur lui-même, le terme chimique, dont alors on doit changer le nom, est inversement proportionnel au carré de l'équivalent : M. Dupré le prouve en appliquant le calcul aux données obtenues par les physiciens expérimentateurs pour le fer, le cuivre, le palladium, l'or et le platine. Il est à souhaiter que de nouvelles expériences rendent possibles des vérifications plus nombreuses; toutefois il paraît difficile d'attribuer au hasard la concordance des cinq résultats déjà connus.

Pour le terme physique, la loi ne laisse désormais aucune prise au doute, et, jointe à la découverte de la force contractile des couches superficielles liquides, elle fait disparaître en grande partie les difficultés, réputées jusqu'ici insurmontables, de la capillarité; en même temps elle rend plus faciles les explications déjà données de certains phénomènes. De nombreuses expériences ont été faites par M. Dupré et son fils, à l'aide de nouveaux appareils qui figureront à l'avenir dans les cours de physique, et qui ont permis de vérifier les lois anciennement connues et celles que la théorie récente a fait obtenir. L'un de ces appareils a servi à la mesure, déjà effectuée par M. Plateau, de la tension de l'air emprisonné dans une bulle de liquide glycérique. Modifié convenablement, il a permis de vé-

Phénomènes
capillaires

riifier pour la première fois la loi que suivent les excès de tension de l'air renfermé dans des bulles de liquides quelconques, d'eau, d'éther, d'alcool. Le cas où la bulle est contenue dans une masse liquide, ce qui rend l'excès de tension moitié moindre, a pu être étudié au moyen du même instrument. Lorsqu'on donne issue à l'air par une ouverture en mince paroi, *les carrés des temps que les bulles emploient pour se vider sont proportionnels aux septièmes puissances de leurs diamètres*. L'appareil construit pour vérifier cette loi, qu'on n'aurait évidemment pu découvrir sans la théorie, a toujours fourni des résultats très-satisfaisants, non-seulement dans les comparaisons des rapports, mais aussi dans l'appréciation de leurs valeurs absolues.

La connaissance de la force contractile des lames glycériques, dont les assemblages à l'état d'équilibre ont été si bien étudiés par MM. Plateau et Lamarle, et du travail correspondant à une diminution d'étendue assignée, a permis de calculer la vitesse énorme avec laquelle leur disparition s'opère lorsqu'on les crève. Elle a rendu facile aussi l'explication de ce qui arrive quand on fait passer au travers de ces lames une petite boule qui les laisse entières sans qu'on devine d'abord comment cela peut se produire.

Ces messieurs ont encore fait construire un appareil spécial pour vérifier le théorème de M. Bertrand, relatif à la tension dans l'intérieur des gouttes, et le succès a répondu à leur attente. A ce théorème M. Dupré en a joint quelques autres qui ont conduit à utiliser l'étude des larges gouttes de métaux fondus sur un support horizontal pour déterminer leur force de réunion. Les phénomènes de détail, même quand ils paraissent d'abord dénués d'intérêt, acquièrent de l'importance parce qu'ils servent à accumuler les preuves de la première loi sur les attractions à petites distances.

Écoulement
par
gouttes.

Un parti analogue a été tiré de l'étude des lois de l'écoulement par gouttes lorsqu'elles se détachent de supports qui satisfont aux restrictions indiquées par la théorie. Dans ce cas, *les carrés des poids*

des gouttes sont proportionnels aux cubes des forces de réunion et en raison inverse des densités. De nombreuses expériences, au moyen de deux appareils différents, ont très-bien confirmé l'exactitude de cette loi en ce qui concerne les liquides étudiés par la balance; ensuite, la prenant pour vraie, on l'a fait servir à la mesure des forces de réunion difficiles à obtenir par des pesées telles que celles du mercure, du phosphore fondu, etc.

L'influence de la tension superficielle des liquides se fait sentir dans beaucoup de phénomènes où on ne la soupçonnait point : ainsi, elle rend moindre la hauteur d'un jet liquide parabolique; et la différence, fort sensible lorsque le diamètre de la veine ne dépasse pas 3 millimètres, a été mesurée au moyen d'un appareil approprié à cet usage et trouvée conforme aux indications théoriques. Cette force contractile est indispensable pour expliquer complètement les attractions et répulsions apparentes capillaires. Laplace, à une époque où elle était inconnue, est arrivé à un théorème dont l'application à un cas particulier conduit au mouvement perpétuel. L'élévation ou l'abaissement des liquides dans les tubes étroits verticaux ou obliques, la manière dont se comportent les flotteurs capillaires, l'endosmose, la diffusion avec production de chaleur ou de froid, ont été encore, de la part de MM. Dupré, les objets d'études théoriques et expérimentales.

Accessoirement, M. Dupré père s'est occupé de la loi qui régit la chaleur produite pendant les combinaisons chimiques des substances considérées à l'état gazeux; il a constaté que, *quand deux corps se combinent et forment un litre du composé, le travail chimique, ou, ce qui est la même chose, la chaleur produite est un multiple d'un nombre constant 1,02, peu supérieur à une calorie.*

Lois
des quantités
de chaleur
produites
par
les combinaisons.

Il a encore étudié, en se servant du premier principe de la théorie mécanique de la chaleur, la transmission du son, et il est arrivé beaucoup plus simplement qu'on ne l'avait fait jusqu'ici

Transmission
du son.

à la formule qui donne la vitesse de propagation. Il a pu constater que, dans le sens ordinaire, elle est seulement approchée ; pour qu'elle soit rigoureuse, on doit modifier la manière d'appliquer le binôme de dilatation qui y entre. M. Dupré arrive en outre à deux formules qui, jointes à la précédente, permettent, étant donnée l'une d'entre elles, de calculer pour un point d'une onde trois des quatre quantités suivantes :

- 1° La pression ;
- 2° La température ;
- 3° La vitesse des molécules ;
- 4° La vitesse de propagation.

Ces formules sont simples et conduisent à des lois remarquables dont on ne connaissait qu'une seule, qui a dû être modifiée.

§ 2. SECOND PRINCIPE FONDAMENTAL.

Les applications du principe de l'équivalence du travail et des forces vives moléculaires ou non sont très-nombreuses, et déjà, pour la plupart, anciennement connues. Parmi elles, il en est beaucoup qui se rattachent à des études qui demeureraient incomplètes, si l'on ne s'appuyait en même temps sur le second principe de la théorie mécanique de la chaleur, dont la découverte est due à Sadi Carnot. Plus tard, Clapeyron a fait paraître sur ce sujet un mémoire remarquable ; mais l'ignorance où l'on était alors du premier principe rendait impossible un énoncé exact et complet. En 1850, MM. Clausius et Rankine ont rectifié ce second principe, et en ont fourni des démonstrations appuyées sur des axiomes dont il est impossible d'accepter l'évidence ; en même temps ils se sont efforcés, pour le faire admettre, de le vérifier au moyen des résultats obtenus par les expérimentateurs les plus habiles. Sous la forme qui lui fut alors donnée, on n'apercevait point son sens mécanique précis ; et M. Clausius, dans l'un de ses mémoires, en a témoigné

ainsi son regret : « Le théorème reste enveloppé dans une forme abstraite sous laquelle il est difficilement accessible à l'intelligence, et l'on se sent forcé de chercher la vraie cause physique dont il est la conséquence. »

M. Dupré a fait voir qu'aucune démonstration *a priori* n'est acceptable; puis il a donné au second principe une forme nouvelle, fixant d'une manière précise son sens mécanique; il le nomme *principe de l'égalité de rendement* et l'énonce ainsi : *Toutes les machines thermiques périodiques où ne se produit aucune chute de chaleur, fonctionnant entre les mêmes températures, offrent un même rendement, c'est-à-dire donnent le même travail pour une même quantité de chaleur, ou la même quantité de chaleur quand on leur fournit le même travail; ou encore, ce qui équivaut et rend les applications souvent plus faciles : Si, dans un assemblage de machines de ce genre, on emploie, en se servant d'un communicateur convenable, la force vive d'un volant pour produire de la chaleur au moyen des unes, et cette chaleur pour rendre, au moyen des autres, de la force vive au volant, ces deux effets contraires sont égaux, et l'appareil, pourvu qu'on néglige les résistances passives, possède la même force vive à la fin de chaque période complète, après laquelle les mêmes mouvements se reproduisent dans le même ordre.*

Après ce changement, l'esprit est plus satisfait, puisqu'une idée abstraite dont on ne voyait point le sens physique se trouve remplacée par un théorème mécanique très-intelligible; mais un avantage beaucoup plus grand encore en est la conséquence. Dans les applications, on voit toujours clairement la marche à suivre, les quantités dont il faut tenir compte dans les calculs et celles qui n'influent point sur le rendement; avec une légère modification dans les mots employés, l'énoncé s'applique sans peine à des questions de magnétisme et d'électricité. Il n'en est pas ainsi du second principe pris sous sa forme précédente, et certes, avec l'égalité de rendement, M. Clausius n'eût jamais songé à introduire comme quantités dont il faut tenir compte dans les calculs les changements de désagrégation qui n'entrent pour rien dans les résultats.

Mouvement
perpétuel.

M. Dupré prouve que le principe de l'égalité de rendement entraîne comme conséquence l'impossibilité de produire des mouvements périodiques dans les masses à l'aide de la chaleur statique que la nature met à notre disposition en quantité indéfinie dans l'atmosphère, dans les eaux, etc. Il établit aussi la réciproque de cette proposition, du moins pour les machines réversibles. Il en résulte, suivant lui, que le principe est *à priori* très-probable, mais non absolument certain; car le mouvement perpétuel résulterait ici de la transformation de la chaleur en force vive des masses; or on regarde aujourd'hui la chaleur comme une force vive moléculaire, et il n'est pas *évidemment impossible* qu'elle produise une force vive dans les masses : ce n'est même vrai qu'avec des restrictions compliquées qui s'opposent entièrement à ce qu'on déclare la chose évidente. C'est donc à l'observation que M. Dupré demande la preuve de l'exactitude du second principe, et non point seulement, comme tous ou presque tous ses devanciers, la confirmation d'une vérité déjà démontrée par le raisonnement. La forme qu'il a donnée à ce second principe rend les applications plus faciles et plus sûres. Il reprend et discute avec le plus grand soin celles qui avaient été déjà faites; il y en joint beaucoup d'autres et se trouve conduit à des lois en grande partie inconnues, et qui, lorsque les données d'expériences ne manquent point, se vérifient toutes aussi bien qu'on peut s'y attendre. Après avoir constaté ainsi l'égalité de rendement de machines nombreuses et variées, sans rencontrer aucun cas d'exception, il devient impossible de contester la généralité du principe à l'aide duquel on peut étudier ensuite les modifications éprouvées par les corps lorsque la température et la pression varient sans chute de chaleur, pourvu que l'état soit déterminé à chaque instant par les valeurs de ces deux quantités. Au moyen d'un petit artifice, on peut l'employer encore quand il y a des chutes.

Par l'application à 1 kilogramme d'une substance quelconque, solide, liquide ou gazeuse, M. Dupré est arrivé à trois équations

générales distinctes qu'il a présentées sous plusieurs formes utiles dans des cas divers.

La première signifie que la capacité vraie, c'est-à-dire la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de 1° , abstraction faite de la chaleur transformée en travail interne ou externe, est indépendante du volume. Cette proposition, aujourd'hui conséquence certaine du principe de l'égalité de rendement, a été donnée auparavant par M. Clausius comme très-probable. M. Rankine s'en est aussi occupé, mais ce savant ne l'appliquait qu'aux cas où le corps ne change point d'état, et M. Clausius repoussait justement cette restriction arbitraire.

Capacité vraie.

La seconde formule fait connaître la dérivée du travail interne par rapport à la pression. Elle était déjà connue, mais M. Dupré a établi deux théorèmes sans lesquels on n'en pouvait presque tirer aucun parti.

Il prouve, en premier lieu, que l'attraction au contact, c'est-à-dire l'attraction mutuelle totale des deux portions d'un même corps situées de part et d'autre d'une section plane conçue dans son intérieur, est, pour chaque unité de surface, précisément égale à cette dérivée. L'équation fournit alors la valeur de cette force en fonctions de quantités que les physiciens expérimentateurs ont mesurées ou peuvent mesurer. C'est la connaissance des attractions au contact qui a conduit M. Dupré à la seconde loi des attractions à petites distances, citées précédemment. En outre, la théorie et l'expérience s'accordent pour montrer que la force produisant la rupture subite d'un corps égale l'attraction au contact ou lui est peu inférieure. Dans l'eau, cette force est 70 millions de kilogrammes par mètre carré; elle équivaut à 7000 atmosphères environ.

Attraction
au
contact.

Approfondissant le même sujet, M. Dupré prouve ensuite que

Désagrégation
totale

l'attraction au contact et le travail nécessaire pour séparer les unes des autres toutes les molécules contenues dans une unité de volume sont exprimés par un même nombre lorsqu'on choisit convenablement les unités; de sorte que le travail de désagrégation totale, au sujet duquel on avait mis en avant plusieurs hypothèses et plusieurs lois inexactes, peut être actuellement calculé avec précision. Pour 1 mètre cube d'eau, on trouve 70 millions de kilogrammètres. Le travail de désagrégation chimique du même corps égale l'équivalent de la chaleur de combinaison; il est connu d'avance, et, opérant en sens inverse, on en déduit au contraire l'attraction au contact chimique, qui est, dans le même liquide, vingt-quatre fois plus grande que l'attraction au contact physique.

Limite
du nombre
des
molécules.

C'est en rapprochant son théorème sur la désagrégation totale de ses études relatives aux forces de réunion, que M. Dupré a obtenu la première donnée qu'on ait vue paraître dans la science sur le nombre des molécules. Appliquée encore à l'eau, elle conduit à ce résultat surprenant : *Dans un cube de ce liquide ayant pour côté 1 millième de millimètre, lequel pèse mille millions de fois moins que 1 milligramme et ne peut être vu qu'à l'aide d'un bon microscope, il y a beaucoup plus de vingt-cinq mille millions de molécules.* Le théorème sur la désagrégation totale fournit encore à son auteur :

1° Une relation entre les coefficients de compressibilité et les données physiques mieux connues;

2° Une loi qui peut être énoncée ainsi : *à température constante le travail restant à accomplir dans un corps pour séparer complètement les molécules est en raison inverse du volume;*

3° Une équation très-simple aux dérivées partielles du troisième ordre entre la pression, le volume et la température, applicable à un corps quelconque; on ne s'était point élevé encore à un aussi haut degré de généralité;

4° Un caractère permettant de reconnaître, pour un corps donné, si le travail est fonction du volume seul, ou s'il ne s'opère point, au

contraire, lorsque la température s'élève sans que le volume change, un travail chimique marquant que la combinaison devient plus ou moins intime.

Pour étudier les gaz et les vapeurs surchauffées, M. Dupré s'est encore servi de la valeur de l'attraction au contact particularisée pour ces substances, en négligeant des quantités qui y sont toujours fort petites. Puisque la formule rigoureuse s'applique aux trois états des corps, on ne peut évidemment demander à la théorie en ce genre que des lois approchées. M. Hirn s'est trompé en affirmant un théorème absolu dont il propose trois démonstrations mathématiques et d'où il cherche à faire sortir les propriétés des vapeurs surchauffées : il n'est pas vrai que, *dans la détente sans travail et sans chaleur externe, le produit de la pression par le volume demeure tout à fait constant*. Les lois de Mariotte et de Gay-Lussac conviennent pour une première approximation. En écartant les quantités assez petites pour qu'il n'y ait point lieu à en tenir compte, même dans une seconde approximation, M. Dupré arrive à ce qu'il nomme la *loi des covolumes*; c'est par elle que les lois de Mariotte et de Gay-Lussac doivent être remplacées toutes les fois qu'il s'agit de discussions ou d'expériences très-précises. Pourvu qu'on ne l'applique point à la fois à des intervalles de température et de pression trop considérables, elle s'accorde très-bien, après une détermination convenable des deux paramètres, avec les faits connus et en particulier avec les résultats obtenus par M. Regnault dans ses admirables expériences. Sans ces résultats, il ne serait point possible de fixer le degré d'approximation que la loi peut fournir et le degré de confiance qu'elle mérite. De la loi des covolumes, M. Dupré tire quatorze autres lois, qui portent sur des quantités petites et difficiles à mesurer avec une exactitude suffisante. Toutefois, si l'on ne peut les dire vérifiées expérimentalement, on voit au moins qu'elles ne sont contredites par aucun fait connu et que les variations des quantités ont toujours lieu dans le sens indiqué par les expériences.

Théorie des gaz.

La neuvième fait prévoir que, pour l'hydrogène, dont exceptionnellement, le covolume est négatif, la différence entre les coefficients de dilatation à pression constante et à volume constant doit présenter un signe contraire à celui qu'elle offre dans les autres gaz. Ce fait remarquable avait été déjà observé par M. Regnault. Quoique ce savant illustre ait atteint une précision bien supérieure à celle qu'on avait obtenue avant lui, les écarts actuels entre la théorie et l'expérience sont de l'ordre des erreurs possibles, et, pendant longtemps encore, sans doute, la loi des covolumes suffira aux besoins de la science, quand il y aura lieu de ne pas s'en tenir aux lois de Mariotte et de Gay-Lussac. M. Dupré a fait voir d'ailleurs que rien jusqu'ici n'autorise à considérer la loi des covolumes comme étant en défaut, même pour les vapeurs voisines de la saturation. Il a prouvé aussi que c'est à tort que M. Hirn et quelques autres savants déclarent du même ordre les erreurs commises en négligeant le travail interne dans une vapeur et en employant la loi de Mariotte. Si l'on veut profiter de toute l'approximation possible depuis les recherches expérimentales de M. Regnault, il faut au moins employer la loi des covolumes. Pour ne laisser aucun doute sur ce point, M. Dupré a entrepris une discussion détaillée, d'où il tire les valeurs des covolumes des divers gaz et celle du coefficient de dilatation limite relatif à l'état gazeux parfait; c'est l'un des nombres fondamentaux de la théorie mécanique de la chaleur. Pour terminer ce qui a rapport aux fluides aériformes, il a encore donné des formules relatives au cas d'une expansion sans travail externe et celles qui fournissent tout de suite fort simplement la grandeur des effets qu'on devra attendre des machines thermiques à gaz, destinées à rafraîchir l'air des appartements dans les pays très-chauds.

La troisième équation obtenue en appliquant le second principe à un corps quelconque renferme la dérivée du travail interne par rapport à la température. M. Dupré l'obtient sous plusieurs formes, qui le conduisent à des conséquences en partie nouvelles sur les

capacités, sur les caractères qui font reconnaître les corps dans lesquels le travail interne dépend du volume seul, sur le travail chimique et la manière de le déterminer dans certains cas.

Le principe de l'égalité de rendement peut être appliqué à des questions très-diverses. M. Dupré s'en est servi pour étudier l'influence de la température et de la pression sur la force contractile des couches superficielles liquides, d'épaisseur égale au rayon de la sphère d'attraction sensible. Pour l'eau, dont les forces de réunion, à des températures croissantes, ont été mesurées par M. Woolf, il a pu constater que la couche superficielle, lorsqu'elle repasse en pleine matière et subit un accroissement de pression considérable, diminue de $\frac{1}{1000000}$ de millimètre, en même temps que sa capacité diminue de $\frac{1}{10}$ environ de sa valeur. Ces résultats sont donnés par des formules générales très-simples, dans lesquelles entrent les dérivées première et seconde de la force de réunion par rapport à la température. Quand le liquide arrive à la surface, sa diminution graduelle de densité est accompagnée d'un travail interne et d'un travail externe qui influent sur la valeur de la force et rendront nécessaires, lorsqu'on possédera des données suffisantes pour d'autres liquides que l'eau, des corrections négligées dans le travail de première approximation. On n'a point encore mesuré les tensions superficielles pour des pressions variant dans une grande étendue; M. Dupré a donné, comme pour le cas des changements de température, des formules générales; mais il n'a pu faire aucune application numérique.

Influence
de
la température
et de la pression
sur la force
contractile.

Le changement d'état d'un corps est, en toute rigueur, un phénomène continu, et les trois équations générales peuvent lui être appliquées. Mais comme, pour les vaporisations du moins, les variations de température ou de pression qui l'accompagnent sont négligeables, on peut admettre, en qualité d'hypothèse devant conduire à des résultats très-rapprochés, qu'un changement d'état est

Changements
d'état.

produit par un changement de température infiniment petit, à pression constante, ou par un changement de pression infiniment faible, à température constante. En appliquant sous ce point de vue le second principe de la théorie mécanique de la chaleur à cette question, on arrive à la formule de Clapeyron et à celle de M. Clausius, dans laquelle figure une nouvelle capacité introduite par lui dans la science et dont l'emploi est très-utile. M. Dupré montre comment ces formules s'appliquent avec quelques modifications aux changements d'état chimiques et à la seconde vaporisation des corps. Considérant surtout le passage de l'état solide à l'état liquide, qui n'est point aussi brusque que les vaporisations, il précise cette théorie par la considération d'une substance idéale qui se comporterait, de part et d'autre du changement d'état, comme la substance réelle loin de la saturation. Déjà M. Regnault, reconnaissant l'utilité de ce genre de considérations, les avait introduites dans la science.

Tensions
maximum
des vapeurs.

L'exactitude de la formule de Clapeyron est une des meilleures preuves que l'on puisse fournir de la vérité du second principe. M. Dupré s'attache à en déduire toutes les conséquences et à les vérifier principalement au moyen des nombres dus à M. Regnault. Il arrive d'abord à une expression simple des forces élastiques maximum; il l'applique à onze liquides et montre qu'elle s'accorde avec les expériences aussi bien que les formules à cinq paramètres, quoiqu'elle n'en contienne que deux. Ces paramètres sont liés d'ailleurs avec les chaleurs latentes et les capacités; ils servent eux-mêmes à des vérifications ultérieures. Les propriétés des corps, même celles qu'on croyait totalement indépendantes les unes des autres, se trouvent ainsi liées intimement entre elles.

Lorsqu'on veut bien s'en tenir à une première approximation et accepter quelques écarts un peu supérieurs aux erreurs possibles dans les expériences, on peut simplifier encore la loi des tensions maximum et l'énoncer ainsi : *Le logarithme du quotient de la force élastique à une température quelconque par la force élastique à 0° égale*

le produit d'un nombre constant, particulier à chaque liquide, par une fonction de la température qui est la même pour toutes les substances. Au fond, c'est à M. Regnault que la science doit la découverte de cette liaison entre les forces élastiques de vapeurs diverses. Dans la discussion de ses expériences, il établit que l'un des paramètres est indépendant de la nature chimique du corps étudié. M. Dupré a obtenu la valeur théorique de ce paramètre, qui égale le carré de l'inverse de l'unité augmentée du coefficient de dilatation limite, et l'accord avec l'expérience ne laisse rien à désirer. S'appuyant sur la loi de M. Regnault, il lui est devenu possible d'opérer la simplification mentionnée plus haut, à l'aide de laquelle on peut, par exemple, dresser un tableau des tensions maximum du brome, quoiqu'on ne connaisse que son point d'ébullition et une seule chaleur latente avec les capacités. En donnant une autre forme à cette loi, il a pu obtenir celle qui lie ensemble les chaleurs latentes de diverses substances à toutes les températures; elle est très-simple, et s'énonce ainsi : *Le rapport des chaleurs latentes de deux corps pris à la même température est indépendant de cette température, ou, ce qui équivaut, les chaleurs latentes se déduisent, pour chaque liquide, de sa chaleur latente à 0°, en la multipliant par une fonction de la température qui est la même pour tous les corps.*

Dans une seconde approximation, M. Dupré procède, en s'appuyant sur la loi des covolumes, à une discussion détaillée des chaleurs latentes obtenues par M. Regnault, et il en déduit, pour valeur très-approchée de l'équivalent mécanique de la chaleur, le nombre 433,5, en même temps que les covolumes et les coefficients de dilatation à volume constant. L'accord de la théorie avec l'expérience est très-satisfaisant; il n'en avait point été ainsi dans les discussions précédemment entreprises, parce que l'équivalent 424 et les lois de Mariotte et de Gay-Lussac ne permettaient point une approximation suffisante.

Quant au passage de l'état solide à l'état liquide, il s'effectue souvent dans un intervalle de température très-appreciable, et de

là résultent des difficultés en partie aplanies par la considération d'une substance idéale; M. Dupré a d'ailleurs obtenu, au moyen de son théorème sur la désagrégation totale, deux lois qui régissent ce phénomène; la chaleur latente de fusion est :

1° *Proportionnelle à la température de fusion augmentée du nombre fondamental 274,3;*

2° *Proportionnelle à l'excès du produit du volume à l'état solide par le rapport des coefficients de dilatation et de compressibilité sur le même produit relatif à l'état liquide.* Il en est ainsi du moins pour les corps simples et pour les corps composés, dans lesquels le travail chimique produit pendant la fusion est négligeable.

Écoulement
des gaz
et des vapeurs.

Dans les applications du second principe fondamental de la théorie mécanique de la chaleur, on n'envisageait que des machines thermiques périodiques, sans chute et réversibles. M. Dupré, dans le principe de l'égalité de rendement, écarte cette dernière restriction, et c'est en considérant une machine non réversible qu'il a démontré l'exactitude de l'expression logarithmique de la vitesse d'écoulement des gaz dans la section à détente complète. Cette expression, déjà proposée pour remplacer celle de Bernoulli, ne pouvait être rendue certaine que par la théorie mécanique de la chaleur, qui a fixé le sens précis qu'on doit lui attribuer, comme elle a fixé plus tard le sens dans lequel il faut prendre la formule qui donne la vitesse du son pour qu'elle soit rigoureuse. L'expression logarithmique de la vitesse d'écoulement est complètement applicable au cas où l'on suppose que le gaz pendant sa détente reçoit de l'extérieur, à chaque instant, la chaleur nécessaire pour maintenir sa température constante. Dans le cas réel, le refroidissement qui accompagne la détente amoindrit la force élastique, et, par conséquent, la vitesse finale est plus faible.

Postérieurement, M. Zeuner a démontré la même formule en s'appuyant sur le premier principe seul. Ce savant professeur a donné en outre une formule pour le cas où chaque portion du gaz acquier-

rait sa vitesse complète aux dépens de sa propre chaleur, sans rien recevoir du gaz qui sortira plus tard ni des corps environnants. M. Dupré a fait remarquer que la vitesse obtenue de la sorte est inférieure à la vitesse réelle, de laquelle on se trouve posséder ainsi deux limites. La comparaison montre que l'erreur commise en employant l'une ou l'autre est, jusqu'à 40 mètres, moindre que $\frac{1}{1111}$, ce qui suffit pour condamner la formule de Bernoulli, bonne à conserver cependant pour les cas ordinaires, parce qu'elle est plus simple et suffisamment approchée. Jusqu'à 122 mètres, l'erreur à craindre est au-dessous de $\frac{1}{1111}$, et même inférieure à $\frac{1}{1111}$ si, au lieu d'employer l'un des résultats fournis par les deux formules, on se sert de leur moyenne. Ainsi la théorie mécanique de la chaleur a fait faire un très-notable progrès à cette importante question de physique mécanique.

Dans les expériences de vérification, d'après ce qui précède, le froid produit par la détente ne doit pas influencer sensiblement sur les résultats, pourvu qu'on ne dépasse point 122 mètres. La mesure directe de la vitesse maximum paraît impossible; c'est au moyen d'un artifice que M. Dupré est parvenu à la déterminer. Conjointement avec son fils, il a d'abord, au moyen d'un appareil construit dans ce but, étudié avec plus de soin qu'on ne l'avait fait auparavant la pression produite dans un vase par le choc d'un jet gazeux perpendiculaire au plan de son ouverture. Ces messieurs se sont assurés, à l'aide de manomètres à alcool inclinés au dixième, que cette pression égale bien celle qui existe dans le réservoir d'où émane le jet; de sorte qu'il est indifférent de mesurer l'une ou l'autre. Cela posé, M. Dupré a fait mouvoir, avec une vitesse connue, le vase dans l'atmosphère en repos, et il ne s'est plus agi que de mesurer la pression pendant le mouvement même. Plusieurs appareils ont été construits afin de réaliser cette pensée; dans le meilleur, M. Dupré met en balance l'action normale de l'air sur l'ouverture d'un ajutage et la force centrifuge de ce même gaz contenu dans un tube rayon. L'extrémité de ce tube, située au centre, est mise, par une

disposition particulière, en communication continue avec un manomètre qui reste stationnaire à toutes vitesses, ce qui montre bien l'égalité indiquée d'avance par le calcul entre la pression due à la force centrifuge et celle due au choc normal produit par le mouvement relatif de l'atmosphère. Cela suffit évidemment pour confirmer la loi, en admettant, ce qui n'est aucunement contestable, que la formule logarithme s'applique à la force centrifuge totale dans le tube rayon. Dans l'exécution de ces expériences et dans le choix des dispositions de l'appareil, M. Paul Dupré a constamment aidé son père. Ces messieurs, en l'absence de tout ajutage, ont profité de la sensibilité et de l'exactitude de leur manomètre pour vérifier par l'observation les lois de la force centrifuge, quoiqu'elles ne fussent pas dans la science considérées comme douteuses. Un second tube rayon porté par la même roue dans l'appareil définitif permet de lire sur un autre manomètre quelle est à chaque instant la vitesse tangentielle, sans se préoccuper du glissement possible de la corde sans fin. La longueur du rayon est telle que son extrémité décrit une circonférence de 1 mètre, et ces messieurs ont pu, dans leurs expériences, atteindre 45 tours par seconde. Les résultats obtenus ont été si approchés, que la formule de Bernoulli a pu être mise en défaut très-nettement par l'observation seule.

Cette manière d'établir, pour une température déterminée, qui demeure bien constante ici, puisqu'il n'y a pas de détente réelle, la liaison qui existe entre la vitesse d'écoulement et les deux pressions, repose essentiellement sur la connaissance de l'action d'un courant gazeux dirigé perpendiculairement au plan de l'ouverture d'un vase. M. Dupré la déduit d'un raisonnement appliqué au cas où le vase se meut dans l'air en repos; il considère aussi le mouvement inverse et détermine de la même manière le degré de vide qui se produit alors. La formule logarithme propre à l'écoulement fait connaître le quotient de la pression interne par la pression externe dans les deux cas, et conduit à ce théorème important : *Lorsqu'un cylindre ouvert par les deux bouts et divisé en deux compartiments par une cloison*

circulaire se meut d'un mouvement uniforme parallèlement à ses génératrices dans l'atmosphère en repos, la pression externe après l'établissement du régime est moyenne géométrique entre les deux pressions internes. Dans ce raisonnement, qui peut, en tout cas, être présenté comme un moyen de découverte de l'action pendant le recul, il est un point très-plausible que l'on peut contester à la rigueur; aussi MM. Dupré se sont-ils attachés à vérifier expérimentalement la raréfaction dans le mouvement de recul, aussi bien que la compression dans le mouvement inverse. Avec leur roue à force centrifuge, munie de ses deux manomètres, l'un est aussi facile que l'autre. Elle peut encore être employée concurremment avec l'appareil qui leur a servi pour étudier l'action perpendiculaire du jet sortant d'un réservoir d'air comprimé, lorsqu'on veut observer l'action oblique qui est, comme l'on sait, proportionnelle au sinus carré de l'angle avec la surface choquée. La roue à force centrifuge est même de beaucoup préférable pour l'étude des raréfactions.

Dans le théorème qui précède, la longueur du cylindre est indifférente; M. Dupré, en la supposant nulle, réduit ce cylindre au disque qui servait de cloison et arrive à la détermination *a priori* de la résistance éprouvée par ce disque, lorsqu'il se meut dans l'air perpendiculairement à sa surface. Cette résistance n'est autre chose que l'excès de la pression antérieure sur la pression postérieure, toutes deux connues théoriquement. Jusqu'à 40 mètres, elle est à peu près proportionnelle au carré de la vitesse, et le coefficient théorique s'accorde avec les meilleures expériences connues, soit qu'on étudie l'action directe, soit qu'on étudie l'action oblique. Pour les vitesses aussi considérables que celles des projectiles, il devient indispensable de conserver les logarithmes. Pour les surfaces brisées ou courbes, M. Dupré fait remarquer que la manière ordinaire de calculer la résistance est mauvaise; il indique des cas où les actions troublantes qu'il signale diminuent considérablement la résistance, et, dans les expériences qu'il a faites à ce sujet avec son fils, des so-

Résistance
de l'air.

lides de formes variées et des modèles de projectiles ont été montés sur la roue à force centrifuge et ont fourni les résultats prévus. Ces petits corps sont creux et leur intérieur communique, au moyen du tube rayon, avec le manomètre pendant le mouvement; un petit trou en un point quelconque de la surface permet de mesurer la tension extérieure, et l'on trouve dans certains cas une raréfaction là où on supposait précédemment une compression. Ces prises d'air opérées successivement sur les diverses parties de la surface d'un modèle de boulet sphérique ou cylindroconique ont commencé à éclaircir la question difficile du mouvement des projectiles dans l'atmosphère.

Dans le cas d'une surface plane perpendiculaire au mouvement, il faut un travail énorme pour maintenir constante une vitesse considérable; lorsqu'elle est de 1000 mètres, le travail s'élève à 80 millions de chevaux pour 1 mètre carré.

Moulins à vent.

Dans l'action perpendiculaire ou oblique d'un courant gazeux sur une surface plane, M. Dupré distingue deux cas. Ses théorèmes sont applicables seulement après que le régime est établi. Mais, si la nature du mouvement s'oppose à ce qu'il s'établisse, comme cela arrive pour les roues des moulins, l'action est alors jusqu'à cinq et six fois plus considérable. Il le montre par la discussion des expériences de Smeaton et fait voir que cela rend tout à fait fautive la théorie reçue pour ce genre de machines. Pour mieux mettre en évidence ce point, MM. Dupré ont soumis à l'action d'un courant constant une petite roue fixée à l'extrémité du fléau d'une balance. Au moyen d'un fil sa rotation était d'abord empêchée; on faisait équilibre, puis on coupait le fil, et, pendant la rotation rapide, il fallait augmenter beaucoup les poids qui mesuraient l'action du courant. Ces remarques trouvent leur application dans le vol des oiseaux, dans le travail du rameur, etc.

Résistance
des liquides.

La résistance des liquides a été de la part de MM. Dupré l'objet d'études théoriques et expérimentales analogues aux études faites

sur les gaz; des appareils convenables ont été construits, et l'observation est venue confirmer encore les indications fournies par les raisonnements. Des actions troublantes se montrent, comme pour les gaz, et dans les mêmes circonstances. Ces messieurs ont reconnu qu'elles sont la cause des difficultés que présente l'emploi du tube de Pitot, modifié par M. Darcy, et il a suffi d'une armature adaptée à l'extrémité du tube pour rendre inutile le coefficient de correction et obtenir des indications sûres.

Depuis la découverte du premier principe de la théorie mécanique de la chaleur, on a souvent insisté sur ce que, dans le monde matériel, la somme totale des travaux à accomplir et des forces vives moléculaires ou non moléculaires est invariable, malgré les transformations incessantes que l'on observe. Souvent aussi on en a conclu que les mouvements pourront être modifiés, mais sans que jamais le repos s'ensuive. Ces conséquences ont une importance philosophique très-grande et incontestable. M. Dupré les a examinées avec attention, et, distinguant les mouvements moléculaires, qui ne peuvent être observés d'une manière immédiate, des mouvements dans les masses, il prouve que, si le premier principe suffit, comme on l'a avancé, pour établir l'impossibilité d'un repos complet, en y joignant le second principe on est forcé de reconnaître que, *abstraction faite des mouvements moléculaires imperceptibles*, tout système matériel tend au repos relatif. Aussi, à une époque bien éloignée sans doute, les mouvements harmonieux que l'astronome admire cesseront d'eux-mêmes, ainsi que les mouvements indispensables à la vie. M. Dupré montre aussi que, dans le passé, ils ont dû commencer par l'action d'une cause extranaturelle.

Tendance
de tout système
matériel
au repos relatif.

FIN.

TABLE DES MATIÈRES.

	Pages.
<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>CHAPITRE I^{er}. — THÉORIE DES ACTIONS MOLÉCULAIRES</u>	13
§ 1 ^{er} . Définitions et généralités.....	13
§ 2. Production de chaleur par le frottement.....	19
§ 3. Mesure de l'équivalent mécanique au moyen de la chaleur développée par le frottement.....	20
§ 4. Développement de chaleur dans la désagrégation des corps.....	22
§ 5. Développement de chaleur dans l'écrasement du plomb.....	23
§ 6. Corrélation des propriétés physiques.....	23
<u>CHAPITRE II. — THÉORIE DES VAPEURS</u>	25
§ 1 ^{er} . Loi des chaleurs latentes.....	25
§ 2. Consommation de chaleur dans la machine à vapeur.....	26
§ 3. Condensation de la vapeur dans la détente.....	29
§ 4. Détente des vapeurs saturées.....	31
§ 5. Théorie des vapeurs surchauffées.....	31
<u>CHAPITRE III. — THÉORIE DES GAZ</u>	34
§ 1 ^{er} . Expériences de Gay-Lussac.....	34
§ 2. Détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur.....	35
§ 3. Détente des gaz.....	38
<u>CHAPITRE IV. — APPLICATION DE LA THERMODYNAMIQUE AUX MACHINES</u>	42

	Pages.
CHAPITRE V. — APPLICATION DE LA THERMODYNAMIQUE À LA PHYSIOLOGIE..	43
§ 1 ^{er} . Consommation de chaleur dans le corps humain..	43
§ 2. Chaleur produite dans la contraction des muscles.	45
CHAPITRE VI. — APPLICATION DE LA THERMODYNAMIQUE À L'ÉLECTRICITÉ...	46
§ 1 ^{er} . Chaleur produite par l'influence de l'aimant sur les corps en mouvement.....	46
§ 2. Chaleur engendrée par un courant qui produit un effet mécanique.....	47
§ 3. Consommation de chaleur dans les machines électro- magnétiques.....	48
§ 4. Origine de la chaleur voltaïque.....	49
CHAPITRE VII. — PERFECTIONNEMENT DE LA THÉORIE MÉCANIQUE DE LA CHA- LEUR.....	55
CHAPITRE VIII. — EXPOSÉ DES TRAVAUX DE M. DUPRÉ.....	58
§ 1 ^{er} . Premier principe fondamental.....	58
§ 2. Second principe fondamental.....	66